

Daniel Denninger

Prozessorientierte Synthesemethodik am Beispiel der  
neuartigen Verlegetechnik "D-3F" zum Überflechten mit drei  
Fadensystemen

**Wissenschaftliche Schriftenreihe der  
CHEMNITZER MONTAGE- UND HANDHABUNGSTECHNIK  
Band 3**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger (Hrsg.)**

**Daniel Denninger**

**Prozessorientierte Synthesemethodik  
am Beispiel der neuartigen Verlegetechnik  
"D-3F" zum Überflechten mit drei  
Fadensystemen**



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ**

**Universitätsverlag Chemnitz**

**2016**

## **Impressum**

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit wurde von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing. genehmigt.

Tag der Einreichung: 07.10.2015

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Maik Berger, TU Chemnitz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Maik Berger, TU Chemnitz  
Prof. Dr.-Ing. Niels Modler, TU Dresden  
Prof. Dr.-Ing. Math. Yordan Kyosev, HS Niederrhein

Tag der Verteidigung: 04.03.2016

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Chemnitz**

09107 Chemnitz

<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://www.mv-verlag.de>

ISSN 2364-4400 (Druck) - ISSN 2364-4419 (Online)

ISBN 978-3-944640-80-8

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-199109>



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Montage- und Handhabungstechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger, Inhaber der Professur für Montage- und Handhabungstechnik, der diese Arbeit betreut und durch seine Anregungen maßgebend geprägt hat. Seine fachliche und persönliche Unterstützung, verbunden mit seiner Diskussionsbereitschaft, waren stets eine große Hilfe. Im Speziellen möchte ich mich für sein entgegengebrachtes Vertrauen und die gegebenen Freiräume bei meinen Untersuchungen bedanken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Niels Modler, Inhaber der Professur für Funktions-integrativen Leichtbau an der Technischen Universität Dresden, danke ich für sein Interesse an meinen Untersuchungen, die zahlreichen Anregungen und die Übernahme des Koreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Math. Yordan Kyosev danke ich für seine fachliche und persönliche Unterstützung, verbunden mit seiner Hilfsbereitschaft und seinem Interesse an meinen Untersuchungen.

In gleichem Maße gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Matthes, der mich in zahlreichen Stunden das Fachgebiet der Getriebetechnik gelehrt und mein Interesse dafür geweckt hat; sowie Herrn Dipl.-Ing. Mathias Riedel, der mir beim Einstieg in die Projektbearbeitung unter tatkräftiger Mithilfe beistand.

Schließlich möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Promotionsstudenten der Professur für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung in einer kollegialen Atmosphäre bedanken. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Andreas Heine, sowie Herrn Dipl.-Ing. Torsten Meyer, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Dank gilt ferner den von mir betreuten Studentinnen und Studenten, die durch kontinuierliche Arbeit und viele Ideen wichtige Beiträge für diese Arbeit lieferten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Wolfgang Emmerich, der in zahlreichen Diskussionen seinen reichhaltigen Erfahrungsschatz mit mir teilte und mein Interesse an der Flechtereie geweckt hat.

In ganz besonderer Weise möchte ich mich bei meiner Frau Jana bedanken, die mich jederzeit und in allen Lebenslagen uneingeschränkt unterstützt, motiviert und durch verantwortungsvolle Übernahme zahlreicher zu erledigender Aufgaben die nötige Entlastung zugunsten meiner Arbeit verschafft hat.

Abschließend gilt mein Dank auch meiner restlichen Familie, sowie allen Freunden, die stets an meiner Seite waren.

Es sei mir noch gestattet, an dieser Stelle meinem Vater zu gedenken, der durch eine kurze aber heftige Erkrankung aus seinem tatkräftigen Leben gerissen wurde.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielstellung</b>	<b>1</b>
1.1	Geschichte der Flechtmaschinen	1
1.2	Zielstellung der Arbeit	6
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>9</b>
2.1	Antriebsentwicklung im Textilmaschinenbau	9
2.1.1	Entwicklungs- und Konstruktionsprozess	9
2.1.2	Einordnung der Mechanismensynthese	15
2.1.3	Prozessorientierte Synthesemethodik auf Basis der Technologiesynthese	21
2.2	Grundlagen der Faserverbundkunststoffe	25
2.2.1	Faserverbundwerkstoffe	25
2.2.2	Aufbau von Faserverbundkunststoffen	28
2.2.3	Verstärkungsfasern	31
2.3	Einordnung der textilen Halbzeuge	35
2.3.1	Technische Textilien	35
2.3.2	Textile Halbzeuge und Preforms	37
2.3.3	Geometrie und Struktur textiler Halbzeuge	41
2.3.4	Auswahl und Eigenschaften textiler Halbzeuge	44
2.4	Technologie des Flechtens	50
2.4.1	Textilprodukte aus verkreuzten Fäden	50
2.4.2	Aufbau und Struktur von Geflechten	51
2.4.3	Halbzeuge und Preforms durch Überflechten	56

<b>3</b>	<b>Antriebstechnische Umsetzung der Flechtverfahren</b>	<b>61</b>
3.1	Einordnung der Flechtmaschinen	61
3.2	Flechtmaschinen nach dem Gangbahn-Flügelrad System	62
3.2.1	Verlegetechnik und Funktionsweise der Rundflechtmaschinen	62
3.2.2	Verlegetechnik und Funktionsweise der 3D-Flechtmaschinen	67
3.2.3	Rund- und Radialflechtmaschinen zum Überflechten	72
3.2.4	Klöppel und Fadenabzugsspannung	74
3.2.5	Abzug und Flechtring	80
3.2.6	Flechtprozess und Prozessbeschreibung	83
3.3	Flechtmaschinen nach dem Rotorflechtmaschinen System	90
3.3.1	Verlegetechnik und Funktionsweise der Rotorflechtmaschinen	90
3.3.2	Umlauf- und Hebelflechtmaschinen	94
3.3.3	Deflektorflechtmaschine	97
3.3.4	Magnatech RB-2TM	98
<b>4</b>	<b>Parameteridentifikation der Flechtsysteme zum Überflechten</b>	<b>101</b>
4.1	Präzisierung der Aufgabenstellung	101
4.2	Analyse einer Radialflechtmaschine	104
4.3	Analyse einer Hebelflechtmaschine	111
4.4	Analyse der Verlegetechniken	118
4.4.1	Vergleich der Flechtgeschwindigkeiten	118
4.4.2	Vergleich der Spulenanordnung	121
4.4.3	Kinematische Prozessbeschreibung	125
4.5	Neukombination der Teilfunktionen und Teilfunktionsträger	130

<b>5</b>	<b>Partielle Optimierung einer konventionellen Hebelflechtmaschine</b>	<b>133</b>
5.1	Technologische Vorgaben zur Leistungssteigerung	133
5.2	Konzept der neuartigen Fadenverlegeeinrichtung	136
5.2.1	Struktur- und Maßsynthese	136
5.2.2	Synthese der optimalen Verlegekurve	141
5.2.3	Mathematische Beschreibung der Fadenlängenänderung	144
5.2.4	Entwicklung eines mechanischen-aktiven Fadenlängenausgleichs	147
<b>6</b>	<b>Prozessorientierte Synthese der neuartigen Rotorflechtmaschine „D-3F“</b>	<b>151</b>
6.1	Flechtfadenverlegung im System „D-3F“	151
6.1.1	Technologiesynthese der Verlegetechnik mit drei Fadensystemen	151
6.1.2	Antriebskonzept zur Funktionalisierung des Systems „D-3F“	155
6.2	Synthesemodell für das ringförmige Antriebskonzept	161
6.2.1	Technologische Vorgaben des Synthesemodells	161
6.2.2	Aufbau des Synthesemodells und Synchronisation	168
6.2.3	Entwurf des Antriebskonzepts	172
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>183</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>187</b>
8.1	Schriften und Bücher	187
8.2	Normen, Richtlinien und Patente	197
8.3	Onlinequellen	204

<b>9</b>	<b>Anlagenverzeichnis</b>	<b>209</b>
9.1	Eingangsbestätigung zur Patentanmeldung	209
9.2	Anmeldungsbewertung durch die SPVA	210
9.3	Kinematische Analyse des Gangbahn-Flügelrad Systems	214
9.4	Kinematische Analyse der Kettfadenverlegung	218
9.5	Kinematische Analyse der neuen Fadenverlegeeinrichtung	222
9.6	Physikalische Machbarkeit	227

## Bezeichnungen

Kurzzeichen	Einheit	Benennung
AA/AI		außen-außen/außen-innen (Verzahnung)
AiF		Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungs- vereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.
AS		Asbest
CA		Acetat
CAD		Computerunterstütztes Konstruieren (engl.: computer-aided design)
CAE		Computerunterstützte Entwicklung (engl.: computer-aided engineering)
CFK		kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CLY		Lyocell
CMD		Modal
CV		Viskose
DFG		Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN		Deutsches Institut für Normung
DMG-Lib		Digitale Mechanismen- und Getriebebibliothek
D-3F		Denninger-3Faden
EL		Polyurethan
EN		Europäische Norm

E-Glas		Electric-Glas (Standard Glasfaser)
E-Modul		Elastizitätsmodul
FEM		Finite-Elemente-Methode
FV		Faserverbund
GFK		Glasfaserverstärkter Kunststoff
ISO		Internationale Organisation für Normung
KDT		Kammer der Technik
MKS		Mehrkörpersimulation
PA		Polyamid
PAN		Polyacrylnitril
PE		Polyethylen
PES		Polyester
PI		Polyimid
PP		Polypropylen
PTFE		Polytetrafluoräthylen / „Teflon“
tex	$\left[ \frac{g}{km} \right]$	Feinheit (Tex-System [ISO 1144:1973] [DIN60910] [DIN60905])
TFP		Tailored Fiber Placement
UD		unidirektional
UG		Umlaufrädergetriebe



VDI		Verein Deutscher Ingenieure
ZIM		Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand
2D		zweidimensional
3D		dreidimensional
a	[mm]	große Halbachse der Ellipse
a <sub>An</sub>	[m/s <sup>2</sup> ]	Normalbeschleunigung in Punkt A
A	[-]	Gelenkpunkt A (Drehgelenk)
A <sub>0</sub>	[-]	Gestellpunkt A <sub>0</sub>
b	[mm]	kleine Halbachse der Ellipse
b <sub>Bahn</sub>	[mm]	Breite der Gleitbahn
b <sub>FF</sub>	[mm]	Flechtfadenbreite
b <sub>Schlitten</sub>	[mm]	Breite des Schlittens
b <sub>Schlitz</sub>	[mm]	Breite des Schlitzes
B	[-]	Gelenkpunkt B (Drehgelenk)
BL	[-]	Vorgegebene Bandlänge / gesamte Fadenlänge
B <sub>n</sub>	[-]	Punkte am Fadenstellglied
B <sub>0</sub>	[-]	Gestellpunkt B <sub>0</sub>
B <sub>∞</sub>	[-]	Gelenkpunkt B (Schubgelenk)
C	[-]	Steg 5 (Kettfadenrotor)

$C_0$	[-]	Fadenabzugspunkt
$d_{aBahn}$	[mm]	Durchmesser der Gleitbahn außen
$d_{aSpule}$	[mm]	Durchmesser der Spule
$d_{Bauraum}$	[mm]	Durchmesser des Spulenbauraums
$d_{iBahn}$	[mm]	Durchmesser der Gleitbahn innen
$D$	[-]	Zentralrad 2 (innere Koppelwelle)
$e$	[mm]	Brennweite der Ellipse
$E$	[-]	Zentralrad 4' (ortsfeste Einzelwelle)
$f$	[-]	Gelenkfreiheitsgrad
$f_i$	[-]	Teilgelenkfreiheitsgrad der jeweiligen Kontaktstelle
$f_{id}$	[-]	Anzahl der identischen Freiheiten
$F$	[-]	Getriebefreiheitsgrad
$F / 4''$	[-]	Zentralrad 4'' (Schussfadenrotor)
$FD$	[-]	Flechtdichte / Bedeckungsgrad
$F_{FA}$	[N]	Fadenabzugskraft
$F_{FAa}$	[N]	axiale Komponente der Fadenabzugskraft
$F_{FAr}$	[N]	radiale Komponente der Fadenabzugskraft
$F_G$	[N]	Gewichtskraft
$F_{Last}$	[N]	Lastkraft

$F_{\text{Leer}}$	[N]	Leerkraft
$F_R$	[N]	Reibkraft
$F_{ZF}$	[N]	Fliehkraft
$g_1$	[-]	Anzahl der Gelenke mit $f = 1$
$g_2$	[-]	Anzahl der Gelenke mit $f = 2$
$h$	[mm]	axialer Versatz
$H$	[mm]	Schlaglänge
$h_{\text{Bahn}}$	[mm]	Höhe der Gleitbahn
$h_{\text{Bahnwand}}$	[mm]	Höhe der Gleitbahn im Bereich des Schlitzes
$i$	[-]	Übersetzung
$i_{\text{max}}$	[-]	maximale Übersetzung
$k$	[-]	Anzahl der Kontaktstellen
$k_A$	[-]	Führungsbahn
$l_{\text{Bauraum}}$	[mm]	Länge des Spulenbauraums
$l_f$	[mm]	veränderliche Strecke
$l_{\text{Spule}}$	[mm]	Länge der Spule
$l_1$	[mm]	Abstand der Gestellpunkte $\overline{A_0B_0}$ / Achsabstand
$l_2$	[mm]	Gliedlänge von Getriebeglied 2
$l_3$	[mm]	Gliedlänge von Getriebeglied 3

$l_4$	[mm]	Gliedlänge von Getriebeglied 4
$L$	[mm]	Flechtfadendlänge
$\Delta L$	[mm]	Fadenlängenänderung
$m_{th}$	[kg]	theoretische Gesamtmasse
$MP$	[-]	Mittelpunkt / Koordinatenursprung
$M1$	[-]	Vektorzug M1
$M2$	[-]	Vektorzug M2
$n$	[-]	Anzahl der Getriebeglieder
$n_{FR}$	[1/s]	Drehzahl der Flügelräder
$n_{41}$	[1/s]	Drehzahl des Schussfadenrotors
$n_{45}$	[1/s]	Relative Drehzahl Schussfaden -/ Kettfadenrotor
$n_{51} / n_{FF}$	[1/s]	Drehzahl des Kettfadenrotors
$N_{FR}$	[-]	Anzahl der Flügelräder
$N_{KF}$	[-]	Anzahl der Kettfäden
$N_{Schlitz}$	[-]	Anzahl der Schlitze
$r$	[mm]	Radius
$r_A$	[mm]	Krümmungsradius von A um $A_0$
$r_f$	[mm]	normierte veränderliche Strecke
$r_{FR}$	[mm]	Radius eines Flügelrades

$r_{\text{Schiene}}$	[mm]	Radius der Schiene
$r_{\text{Spulenstern}}$	[mm]	Radius des Spulensterns
$r_{\text{Sth}}$	[mm]	Radius des Schwerpunktes der theoretischen Gesamtmasse
$r_{\text{ÜP}}$	[mm]	Radius Überwindungspunkt - Maschinenhauptachse
$R$	[mm]	Zylinder- /Schlauchradius
$R_n$	[-]	Fadenführungsrolle n
$s$	[mm]	radialer Versatz
$sp$	[-]	Anzahl der passiven Bindungen
$t_A$	[-]	Tangente an Führungsbahn $k_A$ durch Punkt A
$t_H$	[s]	Zeitintervall zur Ablage einer Schlaglänge
$\ddot{U}P$	[-]	Überwindungspunkt
$\ddot{u}$	[-]	Grad der Überbestimmungen
$v_{ab}$	[m/s]	Abzugsgeschwindigkeit
$v_A$	[m/s]	Geschwindigkeit in Punkt A
$v_{KF}$	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit am Klöppelfuß
$y_{\text{Kett}}$	[mm]	Relativbewegung der Kettfadenverlegung
$y_{MP}$	[mm]	Abstand Spulenchse - Mittelpunkt
$y_{\ddot{U}P}$	[mm]	Abstand Überwindungspunkt - Mittelpunkt

$\alpha$	[Grad] / [°]	Flechtwinkel
$\alpha'$	[Grad] / [°]	Fadeneinlaufwinkel
$\beta$	[Grad] / [°]	Fadenabzugswinkel
$\gamma$	[Grad] / [°]	Umschlingungswinkel
$\varepsilon$	[-]	lineare Exzentrizität
$\lambda$	[-]	Gliedlängenverhältnis
$\mu$	[-]	Reibungskoeffizient
$\pi$	[-]	Kreiszahl
$\rho$	$\left[ \frac{g}{cm^3} \right]$	Dichte
$\sigma$	[Grad] / [°]	Verteilungswinkel der Schlitze
$\varphi_{51}$	[Grad] / [°]	Antriebsbewegung des Kettfadenrotors
$\psi_s$	[Grad] / [°]	Schleifenwinkel
$\psi_{31}$	[Grad] / [°]	Abtriebsbewegung des Fadenhebels
$\omega_{FF}$	$\left[ \frac{Grad}{s} \right]$	Winkelgeschwindigkeit des Kettfadenrotors
$\omega_{FR}$	$\left[ \frac{Grad}{s} \right]$	Winkelgeschwindigkeit der Flügelräder

Alle hier nicht aufgeführten Bezeichnungen und Kurzzeichen sind an den entsprechenden Textstellen näher erläutert.

# 1 Einleitung und Zielstellung

## 1.1 Geschichte der Flechtmaschinen

Die Verarbeitung von Fasern und Garnen zur Herstellung von Kleidern und Körperschmuck ist eine der ältesten Handwerksformen in der Geschichte der Menschheit. Dabei kann das Flechten von Bart- und Kopfharen als die frühzeitigste Form der Flechterei und auch als eine der ersten Techniken zur textilen Verarbeitung betrachtet werden. Schon mit der Herkunft des Begriffes „textil“ aus dem Lateinischen „textilis“ für „gewebt“ oder „geflochten“ [DIN60000] kann diese Tatsache belegt werden. Im Laufe der Zeit entwickelten sich daraus regional unterschiedliche Verfahren der Handflechterei zur Verarbeitung von Garnen mit dem Ziel der Herstellung verschiedener Schmuckartikel oder Gebrauchsgegenstände.

In der Neuzeit wurde zu Beginn des 18. Jahrhunderts mit der Entwicklung der Dampfmaschine durch Thomas Newcomen (1664-1729) und der für den Wirkungsgrad entscheidenden Weiterentwicklung durch James Watt (1736-1819) im Jahre 1769 der Grundstein des Maschinenzeitalters, im Zuge der Industriellen Revolution, gelegt. Vor allem in der britischen Baumwollindustrie fand ein zunehmender Wechsel von der handwerklichen Verarbeitung hin zum Einsatz mechanischer, textilverarbeitender Maschinen statt. Als Mitbegründer dieser technischen Revolution gelten John Kay (1704-1780) und James Hargreaves (1721-1778). John Kay erfand 1733 den Schnellschusswebstuhl mit fliegendem Schützen, der gegenüber den reinen Handwebstühlen deutlich mehr Gewebe produzieren konnte. Um den gesteigerten Bedarf an Garnen zu decken, entwickelte James Hargreaves 1764 die sogenannte „Spinning Jenny“ zum mechanischen Verspinnen der Baumwollfasern zu Garnen. Die „Spinning Jenny“ erlaubte gegenüber dem rein handwerklichen Spinnen eine qualitativ hochwertigere und deutlich produktivere Fertigung von Garnen. Das Weiterverarbeiten der Garne erfolgte zunächst noch in Handarbeit bis Edmond Cartwright (1743-1823) im Jahre 1784 den ersten mechanischen Webstuhl „Power Loom“ vorstellte. (vgl. [Paz10, Koe11])

Im Jahre 1748 wurde Thomas Walford [Gri14] aus Manchester, England, das erste Patent (Nr. 638) über eine Einrichtung zur Herstellung von Geflechten erteilt. Annahmen zu Folge fand die Flechterei ihren Weg über Frankreich und während der französischen Revolution durch Emigranten nach Deutschland, wo die entscheidenden Weiterentwicklungen und Verbesserungen auf Johann Bockmühl aus Wuppertal zurückzuführen sind. Bockmühl baute bis 1767 die vermeintlich erste Flechtvorrichtung, basierend auf dem Gangbahn-Flügelrad System, mit gestellfestem Flechtbett aus Stahl und Eisen [May15]. Die erste industrielle Herstellung von Flechtmaschinen ist um 1880 dokumentiert und basiert auf der von Gustav Langensiepen aus Barmen im Wuppertal am 8. Januar 1878 patentierten „Neuerung an Klöppelmaschinen“ [Lan78]. Barmen gilt noch heute als Wiege des Flechtmaschinenbaus. Ausgehend von der damaligen maschinentechnischen Umsetzung des Handflechtens wurde und wird eine Vielzahl an Flechtverfahren und Flechtmaschinen, beruhend auf dem Gangbahn-Flügelrad System, von den im Wuppertal gegründeten Firmen August Herzog Maschinenfabrik [Aug15a], Krenzler Flecht- und Klöppelspitzenmaschinen [Kre15] und Körting Nachfolger Wilhelm Steeger [Ste15a] entwickelt und vertrieben. Eine Besonderheit für die zeitgenössische Maschinentechnik stellt das rein mechanische Funktionsprinzip zur Fadenüberwachung dar, welches bei einem Fadenriss automatisch zum Stillsetzen der Maschine führt. [Lep53, His12a]

Neben der Herstellung von Heim- und Bekleidungstextilien gewann zur damaligen Zeit auch die Sparte der technischen Textilien an großer Bedeutung. Gerade für die Flechterei spielte das steigende Interesse an Elektrizität sowie die Einführung des Telefons eine entscheidende Rolle bei der Weiterentwicklung der Flechtmaschinen um 1880. Forscher entdeckten die physikalischen Zusammenhänge und Vorteile einer metallischen Schutzhülle zur Isolation von Kabeln; dadurch werden deren Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit enorm gesteigert. Anfänglich wurde die metallische Schutzhülle durch das Umwickeln von Kabeln mit Draht - dem sogenannten Winden - realisiert. Maßgeblichen Anteil an der Entwicklung geeigneter Maschinentechnik trägt Simon W. Wardwell (1849-1921) [War15a, Rho15], der im Auftrag von Joseph R. Leeson [Rho15] das Prinzip der Präzisionswickeltechnik erfand und entsprechende „Winding Machines“ [Wad00] (**Bild 1.2**, links) im Rahmen der Unternehmensgründung der Universal Winding Company of Portland, Maine, 1893,



herstellte. Um der steigenden Nachfrage an Kabeln mit guter Schirmung gerecht zu werden, wurde als Alternative zum Winden auf das äußerst produktive Flechtverfahren zurückgegriffen. Neben der Ausbringungsmenge zeichnet sich das Geflecht selbst durch Robustheit und hervorragende isolierende Eigenschaften aus. Inspiriert von rotierenden Flechtmaschinen, die bereits im späten 19. Jahrhundert hergestellt und beispielsweise in der sogenannten Whip City, Westfield, Massachusetts, zur Fertigung von Peitschen eingesetzt wurden, entwickelte und patentierte auch Simon W. Wardwell seine erste Rotorflechtmaschine 1907 zur Fertigung von umflochtenen Kabeln [Wad07, War15c]. Er perfektionierte mit seiner Entwicklung, der sogenannten Wardwellian oder Deflektorflechtmaschine, alle bisherigen patentierten Versionen und brachte sie schließlich im Jahre 1909 mit einer 24-spuligen Version (**Bild 1.2**, rechts) auf den Markt. Wardwell wurde schnell zum marktführenden Anbieter für die sogenannten Rotorflechtmaschinen, die hauptsächlich zur Fertigung von Kabeln und ähnlichen Produkten eingesetzt wurden. [His12b, His13]

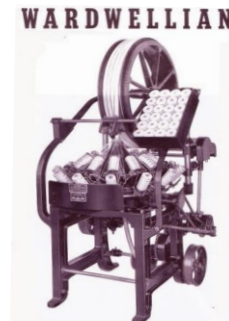
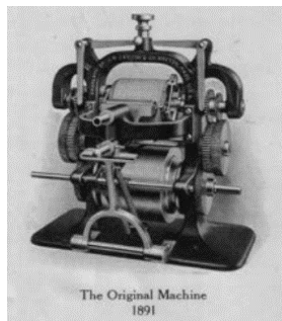


Bild 1. 1: „Universal Winder“ (links); „Wardwellian“ (rechts) [His12b]

Demnach stammen die ersten Rotorflechtmaschinen von der Firma **Standard Machine Works** [Gra15a] aus Nottingham, Großbritannien, die als Vorbild für alle weiteren Entwicklungen von Rotorflechtmaschinen gelten. Bekannte und dokumentierte Vertreter aus Großbritannien wurden von **Larmuth** aus Salford 1904 [Gra15b] (s. **Bild 1.2**, links und mittig) und **Dobson und Barlow** 1900 [Gra15c] (s. **Bild 1.2**, rechts) gebaut und verkauft [His12b]. In den 1920er bis

30er Jahren entwickelten sich auch in Deutschland namhafte Hersteller von Rotorflechtmaschinen nach britischem Vorbild. Es waren zum einen Carl Tober aus Berlin-Karlshorst, der Schnellflechtmaschinen nach dem System „Tober“ [Tob19 bis Tob21b], und zum anderen Guido Horn aus Berlin-Weißensee, der Schnellflechtmaschinen nach dem System „Horn“ entwickelte [Hor20a bis Hor20e].

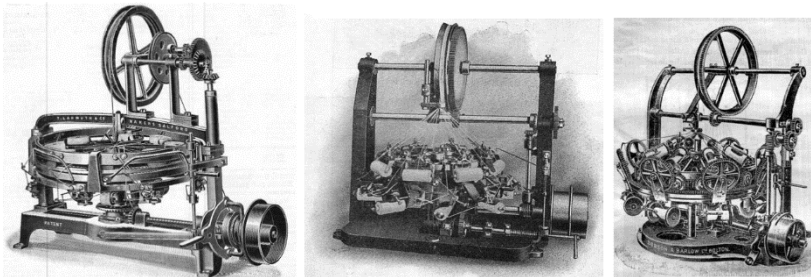


Bild 1.2: Lightning (links); Rapid (mittig); Dobson & Barlow (rechts) [His12b]

Zwar wurde die Firma **Spezialmaschinenbau Guido Horn** im Laufe des zweiten Weltkriegs zerstört, das technische Wissen und der Erfahrungsschatz bestehen jedoch noch heute in der Firma **Spirka Schnellflechter** [Spi15a] fort. Diese stellt Schnellflechtmaschinen nach dem unveränderten System „Horn“ zum Umflechten bzw. Überflechten von Schlauch- und Kabelarmierungen mit speziellen Anforderungen an die Verarbeitung der Flechtmaterialien, wie zum Beispiel Kabel mit Kupfergeflecht als Außenleiter (koaxial) oder Schläuche mit Textil- bzw. Stahlgeflecht zur Verstärkung der Struktur, her. Die Schnellflechtmaschinen nach dem System „Tober“ waren mit einem nahezu identischen Antriebskonzept wie die des Systems „Horn“ ausgestattet. Entscheidende konstruktive Schwachstellen führten jedoch dazu, dass diese Flechtmaschinen, die nur bis 1946 von Froitzheim und Rudert gebaut wurden, nicht auf dem Markt gehalten werden konnten. [Dou64, His12b]

Mit dem Beginn der kommerziellen Produktion von Kohlenstofffasern ab 1971 [AVK14], entwickelte sich ein neuer Markt für technische Textilien. Leichtbauanwendungen stehen zunehmend im Fokus der ressourcen- und energieeffi-

zienten Wertschöpfung. Bei der praktischen Umsetzung stoßen Konstrukteure mit klassischen, metallischen Werkstoffen jedoch schnell an die Grenzen der physikalischen Machbarkeit. Technische Textilien, vor allem in Verbindung mit **FaserVerbund (FV)** -Werkstoffen und -Bauteilen, stellen ihr enormes Potential für Leichtbauanwendungen bereits in einer Vielzahl von Anwendungen unter Beweis. Der Einsatz dieser technischen Textilien ist mehr als nur ein einfacher Materialersatz und erlaubt zielgerichtete Werkstoffauslegung. Neben der reinen Werkstoffsubstitution bieten diese Werkstoffsysteme äußerst aussichtsreiche und vielfältige Alternativen, um den steigenden Ansprüchen der technischen Umsetzung bionischer Strukturen gerecht zu werden. Ziel des Leichtbaus, als richtungsweisende Konstruktionsphilosophie, ist die maximale Gewichtersparnis bei gleichzeitig idealen mechanischen Eigenschaften. Mithilfe von Leichtbauwerkstoffen und Leichtbaukonstruktionen wird unter anderem das Einsparen von Rohstoffen und Betriebskosten, die Reduktion des Energie- und Materialbedarfs oder das Erhöhen der Nutzlast angestrebt. Der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, insbesondere der FV-Werkstoffe, wird dem Bereich des Werkstoffleichtbaus zugeordnet. Beispielsweise wurde für die reine Werkstoffsubstitution durch Bauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) zur Massereduktion, aufgrund der charakteristischen schwarzen Farbe der Kohlenstofffasern, der Begriff „Black-Metal-Design“ geprägt. Vor allem die Kohlenstofffasern haben wegen ihrer deutlich größeren Zugfestigkeit bei geringerer Dichte, im Vergleich zu Stahl, ein enormes Leichtbaupotential. Allerdings kann der Einsatz von CFK nicht nur als reine Werkstoffsubstitution betrachtet werden. Die einzigartigen mechanischen Eigenschaften, die Korrosions- und Temperaturbeständigkeit der Kohlenstofffasern, bieten bisher ungeahnte Möglichkeiten der belastungsgerechten Gestaltung. [Ehr06]

Für Nischenprodukte entsprechen Leichtbauanwendungen aus FV-Werkstoffen dem Stand der Technik. Ein populäres Beispiel sind CFK-Bauteile für den Einsatz im Motorsport, die meist in einer stark handwerklich geprägten Laminatbauweise gefertigt werden. Der schichtweise Aufbau erlaubt das definierte und kraftflussgerechte Ablegen von Verstärkungsfasern, um eine optimale Verstärkungswirkung in einem belastungsgerechten FV-Bauteil zu erzielen. Die erfolgreiche Überführung zur Serienfertigung mit einer gleichbleibenden Produktqualität und Verstärkungseigenschaften verlangt jedoch nach hoher

Produktivität bei reproduzierbarer und kontrollierter Ablage der Verstärkungsfasern. Unter anderem stellt N. Modler [Mod13] neue Wege im Bereich der Automatisierung von Fertigungstechnologien vor, um die geforderten Stückzahlen zu erzielen. In diesem Innovationsprozess gewinnen der Einsatz textiler Halbzeuge, und demnach auch textile Fertigungsverfahren zur Verarbeitung von Verstärkungsfasern, zunehmend an Bedeutung. Mit den wachsenden Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften von FV-Bauteilen sowie deren automatisierte und wirtschaftliche Fertigung, steigen in gleichem Maße die Anforderungen an die eingesetzten textilen Halbzeuge oder Preforms. Die technologische Herausforderung bei der Fertigung dieser technischen Textilien besteht in der Erzeugung einer reproduzierbaren und kraftflussgerechten Faserorientierung und der schädigungsarmen Handhabung der Verstärkungsfasern, bei gleichzeitig variablen Prozessparametern zur geometrisch-flexiblen Gestaltung des Endprodukts. [Che12, Mod12]

## 1.2 Zielstellung der Arbeit

Das Flechtverfahren bietet hervorragende Voraussetzungen zur faserschonenden Verarbeitung von Kohlenstoff- bzw. Verstärkungsfasern und zur wirtschaftlichen Serienfertigung von belastungsgerechten Halbzeugen oder endkonturnahen Preforms. Durch das schichtweise Überflechten von formgebenden Flechtkernen wird die vergleichsweise hohe Faserablagerate der Flechttechnik mit einem gleichzeitig großen Fertigungsrepertoire zur geometrisch-flexiblen Gestaltung ideal kombiniert. Im Speziellen führt die gewebeartige Bindungsstruktur des Flechtmaterials zu einzigartigen strukturell-mechanischen Eigenschaften mit hoher Schadenstoleranz. Zur Realisierung einer reproduzierbaren und kraftflussgerechten Faserorientierung werden meist drei Fadensysteme zu einem triaxialen UD-Geflecht verarbeitet.

Kern der konventionellen Fertigungsprozesse sind Rund- oder Radiaflechtmaschinen, basierend auf dem Gangbahn-Flügelrad System, mit mechanisch-zwangsläufiger Flechtfadenverlegung und gestellfestem Flechtbett. Rotorflechtmaschinen - besonders Hebelflechtmaschinen nach dem System „Horn“ - kommen hierbei nicht zum Einsatz. Die Vorteile des Systems „Horn“ gegenüber dem Gangbahn-Flügelrad System liegen in der abzugsidealen und ausrichtungskonstanten Spulenordnung in Verbindung mit der charakteris-

tischen Flechtfadenverlegung sowie der damit einhergehenden faserschonenden und lageparallelen Verarbeitung des Flechtmaterials. Gleichzeitig ist die gesteigerte Flechtgeschwindigkeit, aufgrund des Maschinenkonzepts mit der gegengleichen Rotationsbewegung zweier Rotoren, für eine wirtschaftliche Serienfertigung von enormem Vorteil [Dou64].

Zielstellung der vorliegenden Arbeit bestand darin, das Potential des Systems „Horn“ zur Herstellung von Halbzeugen oder Preforms durch Überflechten in einem ringförmigen Antriebskonzept mit großer Durchgangsöffnung zu erschließen. Die Herausforderung dabei lag in der Integration eines dritten Fadensystems in eine faserschonende und antriebstechnisch umsetzbare Verlegetechnik zur Fertigung einer triaxialen Flechtstruktur. Für die Synthese der Antriebstechnik zur kinematisch optimalen und lageparallelen Verlegung der Flechtfäden wurde eine prozessorientierte Synthesemethodik, auf Basis einer Technologiesynthese, erarbeitet. Ausgangspunkt dieser Methodik war ein Synthesemodell mit direkter Kopplung an eine kinematische Prozesssimulation zur Gestaltung der Flechtfadenverlegung. Die Synchronisation und Optimierung der Flechtfadenverlegung erfolgte durch die iterative Mechanismensynthese in enger Verknüpfung mit der kinematischen Analyse des vorgeschlagenen Antriebskonzepts. In einem konstruktiven Entwurf wurden die physikalische Machbarkeit des neuartigen Antriebskonzepts sowie die zerstörungsfreie Flechtfadenverlegung nachgewiesen. Das Ergebnis ist das Antriebskonzept der neuartigen Rotorflechtmaschine „**D-3F**“ (Denninger-**3F**aden) zur Herstellung einer gewebeartigen Bindungsstruktur als Kombination aus Gelege und Geflecht bzw. Gewebe: „**D-3FG**“ (Denninger-**3F**aden **Ge**flecht).

Die Schwerpunkte und Zielsetzung der Arbeit stellten sich wie folgt dar:

- Technologische Grundlagen zur Gestaltung von belastungsge-rechten Faserverbundbauteilen durch den Einsatz von textilen Halbzeugen
- Parameteridentifikation der Flechtsysteme zum Überflechten, im Speziellen einer Hebelflechtmaschine und einer Radialflechtmaschine

- Technologiesynthese der Verlegetechnik mit drei Fadensystemen durch die Neukombination von Teilfunktionen und Teilfunktionsträgern
- Prozessorientierte Synthese im Synthesemodell für ein ringförmiges Antriebskonzept mit direkter Kopplung an eine kinematische Prozesssimulation
- Synchronisation und Optimierung der Flechtfadenverlegung durch die iterative Mechanismensynthese in enger Verknüpfung mit der kinematischen Analyse
- Entwurfskonstruktion des neuartigen Antriebskonzepts zur Verifikation der zerstörungsfreien Flechtfadenverlegung und der physikalischen Machbarkeit

## **2 Grundlagen und Stand der Technik**

### **2.1 Antriebsentwicklung im Textilmaschinenbau**

#### **2.1.1 Entwicklungs- und Konstruktionsprozess**

Mit den wachsenden Anforderungen an die Fertigung von FV-Bauteilen, steigen neben den Anforderungen an die textilen Halbzeuge auch die Anforderungen an deren Produktions- oder Fertigungsprozesse. Die technologische Herausforderung bei der Fertigung dieser technischen Textilien besteht in der Erzeugung einer reproduzierbaren und kraftflussgerechten Faserorientierung und der schädigungsarmen Handhabung der Verstärkungsfasern, bei gleichzeitig variablen Prozessparametern zur geometrisch-flexiblen Gestaltung des Endprodukts. Aus diesen meist umfangreichen technologischen Vorgaben und den geforderten Ausbringungsmengen zur Realisierung einer wirtschaftlichen Serienfertigung, resultieren Anforderungsspezifikationen für die Entwicklung eines textilen Fertigungsprozesses und der einhergehende Anlagentechnik. Bei der Umsetzung dieser Anforderungen in einer spezifikationskonformen Anlagentechnik greifen Konstrukteure der Textilmaschinen- bzw. Anlagenhersteller in der Regel auf bekannte und beherrschbare Antriebstechnik aus konventionellen Fertigungsprozessen zurück. Aufgrund der meist anspruchsvollen kinematischen Vorgaben zur Verarbeitung und Handhabung der Fäden, kommen in Textilmaschinen zur Bewegungserzeugung nach wie vor hauptsächlich mechanische Antriebslösungen zum Einsatz.

Um die Diskrepanz zwischen der vorhandenen Antriebstechnik und den technologischen Vorgaben zu überwinden, nimmt die Synthese dieser Antriebslösungen einen entscheidenden Stellenwert im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess ein. Das Mittel der Wahl ist dabei in der Regel die Adaptierung von konventionellen Antriebslösungen durch die partielle Optimierung oder die Erweiterung von konventionellen Fertigungsprozessen durch die Integration zusätzlicher Antriebsbaugruppen und Funktionalitäten (vgl. [Wal13, Mey14]). Mit dieser Vorgehensweise werden Entwicklungsrisiken minimiert und konventionelle Fertigungsverfahren sowie Textilmaschinen auf die Bedürfnisse zur Verarbeitung von Verstärkungsmaterialien angepasst [Pin12].

Die begrenzten Möglichkeiten, im Rahmen der partiellen Optimierung, erlauben jedoch selten eine prozessoptimale antriebstechnische Lösung. Weiterhin eröffnet sich dadurch nur ein vergleichsweise geringer Inventionsgrad zur Entwicklung neuartiger Textilprodukte mit neuen Bindungsstrukturen und neuartigen Fertigungsverfahren. Die Umsetzung von derart spezialisierten Fertigungsverfahren erfordert grundlegende, aber teils nicht vorhandene Kenntnisse der Prozessabläufe zur definierten Beschreibung der kinematischen Anforderungen und die direkte Berücksichtigung der antriebstechnischen Realisierbarkeit im Erfindungsprozess. Aufgrund fehlender Referenzen und unbekannter Prozessparameter stellen meist Erfahrungswerte den Startpunkt einer Innovation dar, die mit den klassischen Werkzeugen und Algorithmen der Konstruktionsmethodik sowie der Mechanismensynthese umgesetzt werden. Auch die neuen technologischen Vorgaben sind durch Adaptierungen nur bedingt mit den geforderten Ausbringungsmengen für eine wirtschaftliche Serienfertigung zu vereinen. Die tatsächliche Funktionserfüllung und die detaillierte Studie des Prozesses kann erst mit Hilfe eines realen Prototyps durchgeführt werden. Mit steigendem Neuheitsgrad erhöht sich die Anzahl an Iterationsschleifen und Prototypen, die bis zur Serienreife einer neuen Anlage benötigt werden, und nicht zuletzt auch das gesamte Entwicklungsrisiko.

Die Vielzahl an Getriebestrukturen zur Lösung von Bewegungsaufgaben machen die Mechanismensynthese zu einem unverzichtbaren Werkzeug im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess der Textilmaschinenentwicklung. Neben der einfachen Übersetzung von Bewegungs- oder Kraftgrößen spielt, vor allem im Textilmaschinenbau, die Bewegungsumformung zur Herleitung von technologiebedingten Führungs- oder Bewegungsaufgaben eine entscheidende Rolle. Beispiele für den Einsatz mechanisch-zwangsläufiger und nichtlinear-übersetzender Getriebe zur Lösung von Führungs-/Bewegungsaufgaben sind der Antrieb der Schiebernadel beim Kettenwirken [Hes13], der Zunggennadeln oder der Fadenwechseleinrichtungen beim Stricken [Dre13] und der Schützen oder Webladen beim Weben [Boe12]. Der Einsatz von mechanischen Getrieben bietet Vorteile hinsichtlich der zu erwartenden Fehlerresistenz, Robustheit, Bedienbarkeit und nicht zuletzt der Wirtschaftlichkeit gegenüber elektronisch gesteuerter Servoantriebstechnik. Zudem gewinnen mechanische Getriebe durch die fortschreitenden Möglichkeiten der Fertigungstechnik zunehmend an Leistungsfähigkeit und Genauigkeit. Trotz der genannten Vorteile von mechanischen Getrieben bietet sich der zielgerichtete Einsatz der



Servoantriebstechnik, beispielsweise als Ersatz für Kurvengetriebe [Hei15], oder auch hybrider Antriebslösungen [Ber97], an. Sowohl die flexible Bewegungsgestaltung als auch der vergleichsweise geringe Aufwand bei der Integration in Maschinenkonzepte eröffnen neue Möglichkeiten. Die Aufgabe eines Konstrukteurs besteht unter anderem darin, die Frage nach der zweckoptimalen Antriebslösung zu klären und diese Lösungssuche effektiv und zielgerichtet in den klassischen Ablaufplan der Konstruktionsmethodik einzubinden, **Bild 2.1**.

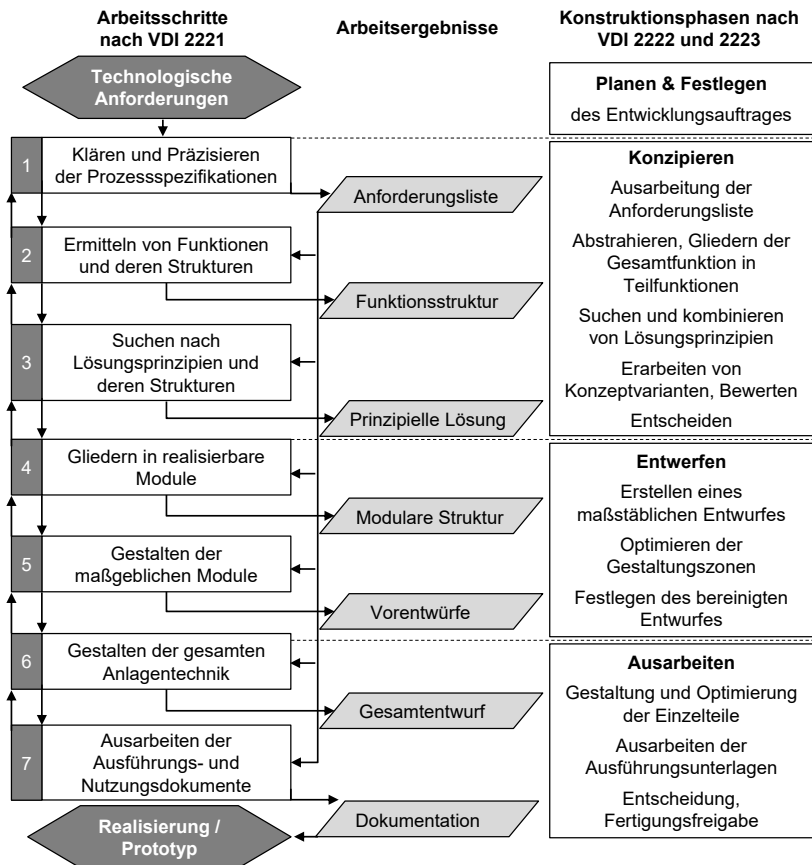


Bild 2.1: Ablaufplan der Konstruktionsmethodik

Diese Methodik wurde vom VDI-Richtlinienausschuss „Methodische Produktentwicklung“ in der Richtlinienreihe VDI 2221 – VDI 2225 [VDI2221 bis VDI2225-4] standardisiert und zeigt das planmäßige Vorgehen beim Entwicklungs- und Konstruktionsprozess technischer Systeme und Produkte. Den vier Konstruktionsphasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten sind sieben Arbeitsschritte zugeordnet, aus denen je ein Arbeitsergebnis hervorgeht. Kennzeichnend für diese Methodik ist das iterative Vorgehen, kombiniert mit Entscheidungsschritten, um die Konkretisierung des Prozesses herbeizuführen. Die für die folgenden Ausführungen und Abbildungen herangezogenen Fachbücher (vgl. [Rod91, Kol94, Rot00, Rot01, Pah07, Fel13]), weisen geringfügige Unterschiede in der Einteilung der Konstruktionsphasen und der zugehörigen Arbeitsschritte auf.

### **Konstruktionsphase *Planen***

Mit der Produktplanung wird ein Entwicklungsauftrag mit der Konkretisierung der Entwicklungsaufgabe initiiert. Der Planungsvorgang wird von der Unternehmens- oder Vertriebsleitung vorgenommen und liegt als solches nicht im Aufgabenbereich des Konstrukteurs. Das Mitwirken von erfahrenen Konstrukteuren in der Planungsphase ist jedoch hilfreich, um bei der Produktgestaltung frühzeitig auf technische und technologische Aspekte eingehen zu können.

### **Konstruktionsphase *Konzipieren***

Mit dem Arbeitsschritt 1- „Klären und Präzisieren der Prozessspezifikationen“ wird zu Beginn der Konstruktionsphase die Entwicklungsaufgabe spezifiziert und in einer Anforderungsliste zusammengefasst. Sie dient als Informationsgrundlage und enthält alle vom Auftraggeber geforderten Lasten, sowie deren Zweck und Eigenschaften. Eine Anforderungsliste begleitet den gesamten Konstruktionsprozess und ist idealerweise zu jedem Zeitpunkt auf dem aktuellen Stand. In der Praxis sind ständige Änderungen und Ergänzungen jedoch unüblich und die Anforderungsliste wird zu einem geeigneten Entwicklungszeitpunkt eingefroren.

Aufgabe des Arbeitsschritts 2- „Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen“ ist die klare und übersichtliche Strukturierung der vom Produkt bzw. System zu erfüllenden Funktionen in einer Funktionsstruktur, **Bild 2.2**.

Ausgehend von der Gesamtfunktion erfolgt die systematische Aufgliederung in Teilfunktionen. Eine Funktion beschreibt das Verhalten des Produkts hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße. Grundsätzlich wird die Funktion aller Textilmaschinen über die Umsetzung der drei Größen Information, Energie und Stoff beschrieben. Die Funktionsstruktur stellt die strukturelle Grundlage für die Suche nach konstruktiven Lösungsprinzipien zur Realisierung der gestellten Aufgabe dar. Eine Spezifikation hinsichtlich der technischen Mittel, der Mechanismen oder der Energieart hat zu diesem Zeitpunkt noch nicht stattgefunden.

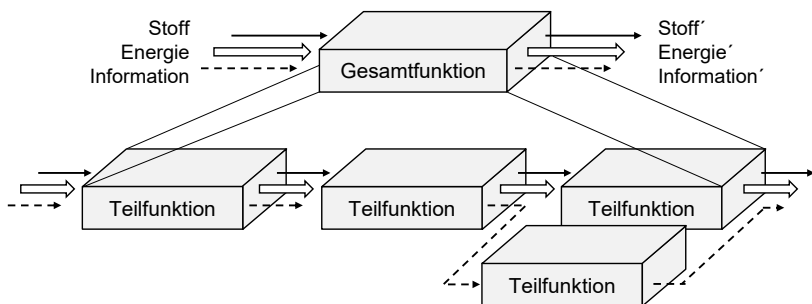


Bild 2.2: Funktionsstruktur technischer Systeme (vgl. [III15])

Aufgabe des Arbeitsschritts 3- „Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen“ ist die Suche nach funktionsbestimmenden Lösungsprinzipien zur Erfüllung der Teilfunktionen. Lösungs- oder Wirkprinzipien enthalten bereits wirkstrukturelle Festlegungen und basieren auf physikalischen Effekten. Anschließend werden die Effekte mit Gestaltungselementen wie Geometrie, Bewegung oder Werkstoffart verknüpft. Das so ermittelte Lösungsprinzip wird in Form einer Prinzipskizze dokumentiert. In der Praxis werden verschiedene Teilschritte integriert oder zusammen bearbeitet. So ist es zum Beispiel möglich, dass der Effekt bereits in den Gestaltungselementen enthalten ist, bzw. der Effekt verschiedene Gestaltungselemente fordert. Im **Bild 2.3** sind die möglichen Varianten I (ideale Vorgehensweise) bis VI zur Findung der Lösungsprinzipien dargestellt.

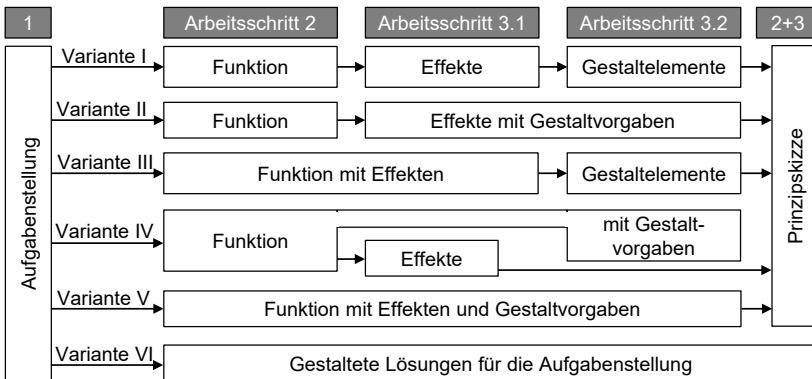


Bild 2.3: Strategien zur Findung von Lösungsprinzipien (vgl. [III15, VDI2222])

Die Gegenüberstellung und Bewertung der verschiedenen Prinzipien erfolgt in tabellarischer Form und nach den Vorgaben der VDI 2225 mit Hilfe eines morphologischen Kastens, **Bild 2.4**. Durch Kombination der verträglichen Teillösungen ergeben sich mehrere prinzipielle Lösungsvarianten, die nach dem festgelegten Punktesystem mit einer Abstufung von null bis vier Punkten, auf Basis der in der Anforderungsliste definierten Kriterien, bewertet werden. Die Variante mit der höchsten Bewertung wird dementsprechend für die Konstruktion ausgewählt.

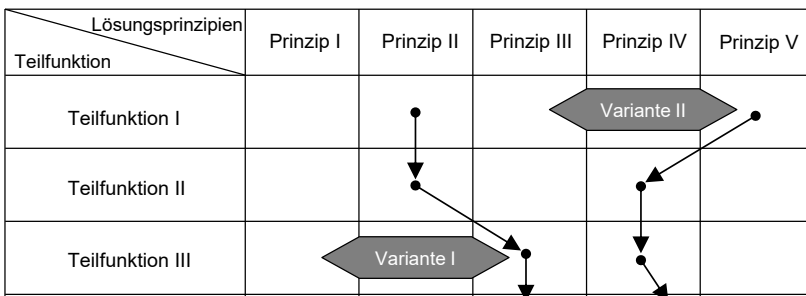


Bild 2.4: Morphologischer Kasten (vgl. [III15])

## Konstruktionsphase Entwerfen

Mit dem Arbeitsschritt 4- „Gliedern in realisierbare Module“ erfolgt die Überführung der prinzipiellen Lösung in eine modulare Struktur mit realisierbaren Modulen. Dadurch können Entwicklungsschwerpunkte gesetzt und die Gesamtentwicklung zunächst auf Hauptbaugruppen verteilt werden. Entwicklungsschwerpunkte sind, unter anderem, die fertigungs-, festigkeits- oder montagegerechte Gestaltung. Die Grobgestaltung der maßgeblichen Module im Arbeitsschritt 5- „Gestalten der maßgeblichen Module“ dient der geometrischen und stofflichen Konkretisierung. Das Gestalten selbst umfasst das Anordnen, Optimieren und Konstruieren der Module. Arbeitsergebnis dieses Arbeitsschritts sind Vorentwürfe der maßgebenden Module in Form von grobmaßstäblichen Zeichnungen.

## Konstruktionsphase Ausarbeiten

Im Arbeitsschritt 6- „Gestalten des gesamten Produkts“ werden die Grobentwürfe verknüpft und durch die Baugruppen der Begleitprozesse ergänzt. Das Ergebnis der sogenannten Feingestaltung ist ein Gesamtentwurf, in dem alle gestalterischen Festlegungen enthalten sind. Dazu gehören sowohl maßstäbliche Zeichnungen, als auch vorläufige Stücklisten. Im Arbeitsschritt 7- „Ausarbeiten der Ausführungsdokumente“ werden alle übrigen Festlegungen getroffen und die Produktdokumentation erstellt. Diese umfasst alle Einzelteil- und Gesamtzeichnungen, Fertigungs- und Montagevorschriften, Stücklisten und Betriebsanleitungen.

### 2.1.2 Einordnung der Mechanismensynthese

Um das Potential des Systems „Horn“ zur Herstellung von belastungsgerechten Preforms durch Überflechten in einem ringförmigen Antriebskonzept mit großer Durchgangsöffnung zu erschließen, war die Adaptierung der konventionellen Antriebslösungen durch partielle Optimierung von Teilfunktionen nicht zielführend (vgl. **Kapitel 5.1**). Vor allem die Integration eines dritten Fadensystems in die konventionelle Verlegetechnik erschien, in Bezug auf die schadigungsarme Verarbeitung der Flechtfäden, fragwürdig und zur Herstellung textiler Halbzeuge oder endkonturnaher Preforms nach dem publizierten

Stand der Forschung ungeeignet. Für die Synthese der Antriebstechnik zur kinematisch optimalen und lageparallelen Verlegung der Flechtfäden wurde daher ein neuer Ansatz zur ganzheitlichen Mechanismen- und Technologiesynthese, auf Basis der Bearbeitungsschritte der klassischen Mechanismensynthese, erarbeitet (vgl. **Kapitel 2.1.3**). In den folgenden Ausführungen wird zunächst die klassische Verfahrensweise der Mechanismensynthese nach J. Volmer [Vol68, Vol92] erläutert, um darauf aufbauend die Technologiesynthese konkretisieren und einordnen zu können.

Die Mechanismensynthese einer zweckoptimalen Antriebslösung versteht sich als Teildisziplin des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses und kann mit fließenden Übergängen in den Ablaufplan der Konstruktionsmethodik integriert werden [Hag09]. Um die Anlagentechnik eines kompletten Fertigungsprozesses zu entwickeln, sind jedoch vielfältige konstruktive Aufgaben und mitunter mehrere Bewegungsaufgaben zu erfüllen. Ausgangspunkt einer derartigen Aufgabenstellung ist daher die klare und übersichtliche Strukturierung des Gesamtmaschinenkonzepts und die definierte Beschreibung der von den Antriebslösungen zu erfüllenden Funktionen. Zur Lösung einer technologiebedingten Bewegungsaufgabe muss diese, unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Eingangsgrößen, mathematisch beschrieben werden. Diese numerische Darstellung der Anforderungsspezifikationen erfolgt in Form einer Bewegungsaufgabe und kann der Konstruktionsphase des *Konzipierens* zugeordnet werden. Alle Schritte der klassischen Mechanismensynthese bauen auf der eingangs definierten Bewegungsaufgabe auf. Ziel der Mechanismensynthese ist die iterative Ermittlung der kinematischen Hauptabmessungen einer zugrunde gelegten Getriebestruktur zur Funktionalisierung dieser technologiebedingten Bewegungsaufgabe.

## **Führungs-/Bewegungsaufgabe**

Das Klären und Präzisieren steht in enger Verknüpfung mit der Beschreibung der technologiebedingten Führungs-/Bewegungsaufgabe. Grundlegend müssen alle verfügbaren Randbedingungen und Eingangsgrößen geklärt und die zu erfüllende Funktion präzisiert werden. Die Präzisierung der Funktion erfolgt auf Basis der Prozessbeschreibung, in der alle benötigten technologischen Schritte zur Fertigung oder Montage eines Produkts mit gewünschten Eigen-

schaften zusammengefasst sind. Wie in [Den13a] beispielhaft gezeigt, werden zur Formulierung der Bewegungsaufgabe signifikante Prozesspunkte ermittelt, die technologische Zwangsbedingungen enthalten. Nach den Vorgaben von T. Schaeffer [Sca99], werden den Prozesspunkten zeitliche und räumliche Mindestanforderungen zugewiesen. Die Prozesspunkte bilden das Gerüst für die Beschreibung der Bewegungsaufgabe und deren mathematischer Interpretation im Bewegungsplan. Grundsätzlich werden in diesem Schritt alle technologisch notwendigen Anforderungen, in Form von Randbedingungen, und die zu erfüllende Bewegungsaufgabe, in Form einer Übertragungsfunktion oder einer Führungsbahn, definiert.

Im Falle einer Übertragungsfunktion werden Übertragungsgetriebe zur Übertragung mechanischer Leistung eingesetzt, die eine funktionale Abhängigkeit zwischen gestellgelagerten Bewegungen von An- und Abtriebsgliedern erzeugen. Zur Realisierung einer Führungsbahn kommen Führungsgetriebe zur Führung von Getriebegliedern, entlang einer geforderten Punktbahn, oder von Ebenenlagen, zum Einsatz. Eine Kombination aus Führungs- und Übertragungsgetriebe ist grundsätzlich möglich und in einigen Fällen nicht eindeutig zu separieren. Die mathematische Beschreibung und Visualisierung der Führungs-/Bewegungsaufgabe bezieht sich, beispielsweise in einem Bewegungsschaubild (s. **Bild 2.5**), als Ausgangspunkt der Synthese von Übertragungsgetrieben (speziell von Kurvengetrieben), im Wesentlichen auf die exakte Zuordnung der An- zur Abtriebsbewegung.

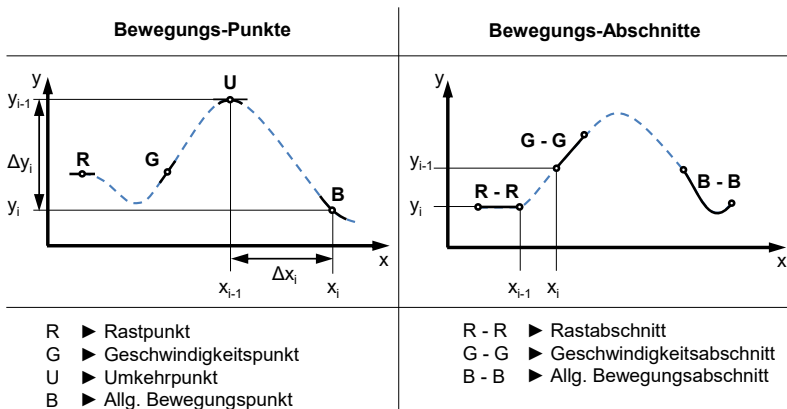


Bild 2.5: Bewegungsschaubild

## Struktursynthese

Nach dem Aufstellen des Bewegungsplans erfolgt die Auswahl einer zur Realisierung der Bewegungsaufgabe geeigneten Getriebestruktur. An dieser Stelle müssen verschiedene Kriterien berücksichtigt und bewertet werden. Erster Anhaltspunkt bei der Auswahl ist neben der Bewegungsform des An- und Abtriebs (rotatorisch oder translatorisch), die räumliche Anordnung der Getriebeglieder bzw. die Lage der Drehachsen der Gelenke (eben, sphärisch oder räumlich). Meist bilden Bauraumrestriktionen oder die physikalische sowie konstruktive Machbarkeit eine Grenze für die Komplexität (Anzahl der Glieder, Art und Anzahl der Gelenke) bei der Struktursynthese. Für Anhaltspunkte und weiterführende Literatur zur Einteilung und Auswahl geeigneter Grundstrukturen sei an dieser Stelle auf die Konstruktionskataloge VDI 2727 [VDI2727-1 bis VDI2727-6] und KDT „Arbeitsblätter für die Konstruktion von Mechanismen“ [KDT83] verwiesen. Hier sind verschiedenste Mechanismen kategorisiert und mit praxisorientierten Kennwerten und Hinweisen versehen. Für eine umfangreiche Sammlung an Fachliteratur zur Entstehung der Struktur- und Aufbaulehre, von den historischen Anfängen Leonardo da Vincis über Galileo Galilei hin zu Franz Reuleaux bis zur heutigen Zeit, sei an dieser Stelle auf die DMG-Lib „Digitale Mechanismen- und Getriebebibliothek“ [DMG15] hingewiesen.

## Maßsynthese

Nach der Auswahl der prinzipiell zur Lösung der Bewegungsaufgabe geeigneten Getriebestruktur erfolgt die Maßsynthese. Ziel der Maßsynthese ist die Ermittlung der exakten kinematischen Hauptabmessungen zur Lösung der eingangs definierten Bewegungsaufgabe, unter Berücksichtigung von möglichst günstigen Übertragungseigenschaften kinematischen Parameter und zusätzlichen Randbedingungen. Im Wesentlichen ist zwischen direkten Syntheseverfahren (z.B. Lagensynthese) und iterativen Syntheseverfahren (z.B. Parameterstudien) zu unterscheiden. Bei den bekannten Verfahren der Lagensynthese (Zweilagen, Dreilagen, Vierlagen, Fünflagen, Totlagen) führt eine erfolgreiche Synthese mit einer eindeutig vorgegebenen Bewegungsaufgabe zur exakten Funktionserfüllung. Im Gegensatz dazu werden iterative Syntheseverfahren bei nicht eindeutig beschreibbarer Funktionserfüllung, beispielsweise beim Umsetzen neuer technologischer Anforderungen oder bei



vorhandenen Toleranzfeldern bekannter Bewegungsaufgaben, eingesetzt. Ein weiteres Anwendungsgebiet für iterative Syntheseverfahren besteht in der Synthese zusammengesetzter Strukturen, für die keine direkten Verfahren existieren oder diese Verfahren mathematisch nur schwer umsetzbar sind. [Bey31]

### **Kinematische Analyse**

Die richtungsweisende Erfolgskontrolle der Maßsynthese wird mit Hilfe einer kinematischen Analyse durchgeführt. Diese Analyse dient der Ermittlung kinematischer Parameter (Weg, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen etc.) zur Beurteilung der Funktionserfüllung. Weitere Anwendungsgebiete liegen in der Analyse von Übertragungseigenschaften (Übertragungswinkel oder Krümmungen) und indirekt in der Grundlage für dynamische Analysen [Dre12]. Wie bereits von Volmer [Vol68] beschrieben, stellt sie damit ein wichtiges Werkzeug bei der Weiterentwicklung oder der Synthese von Mechanismen für neue Anwendungen dar. Beispielsweise wird bei der Durchführung eines iterativen Syntheseverfahrens die Maßsynthese, in enger Verknüpfung mit der kinematischen Analyse iterativ wiederholt, bis eine funktionserfüllende Lösung gefunden ist. Vielmals kommen an dieser Stelle mathematische Optimierungsverfahren und Sensitivitätsanalysen zum Einsatz. Sollte bei wiederholten Iterationsschritten keine brauchbare Lösung gefunden werden, muss eine neuerliche Struktursynthese erfolgen.

### **Konstruktiver Entwurf**

Nach der erfolgreichen Verifikation der Bewegungsaufgabe durch die kinematische Analyse erfolgt in der Regel die Aufbereitung der Getriebestruktur zu einem konstruktiven Entwurf. Ziel des Entwurfs ist die Überführung der funktionsbestimmenden Getriebeglieder und Getriebeorgane in ein räumlich ausgeprägtes Antriebskonzept und dessen Integration in die geometrischen Gegebenheiten der Anforderungsspezifikationen. In der Regel wird ein konstruktiver Entwurf mit Hilfe einer CAD-Software parametrisch generiert, in der Werkstoffe meist standardisiert zugewiesen werden müssen. Aus den so entstandenen Volumina der Getriebeelemente können, in Verbindung mit der spezifischen Dichte, Masseparameter abgeleitet werden. Der konstruktive Entwurf stellt demnach die unerlässliche Vorstufe von kinetostatischen und

kinetischen Analysen dar. Vor allem für räumliche oder sphärische Getriebestrukturen spielt bereits die Gestaltung der Gelenke eine entscheidende Rolle hinsichtlich der kinetostatischen Analyse sowie dem Festlegen von Form- und Lagetoleranzen. In gängigen Softwarelösungen werden CAD- und MKS Funktionalitäten, bereits in Hinblick auf kinetostatische und kinetische Analysen, in einer Nutzeroberfläche kombiniert. Demnach ist die Berücksichtigung einer Vielzahl weiterer physikalischer Effekte als Stand der Technik zu betrachten und bereits im frühen Entwicklungsstadium anwendbar.

### **Kinetostatische Analyse**

Die kinetostatische sowie dynamische Simulation und Analyse dient der Verifikation der kinetostatischen wie auch dynamischen Eigenschaften der synthetisierten Getriebestruktur und der Entwurfskonstruktion. Mit den umfangreichen Möglichkeiten von Mehrkörpersimulationswerkzeugen wird der konstruktive Entwurf iterativ verfeinert und Schritt für Schritt zu einem virtuellen MKS-Modell, zunächst nach den Vorgaben zur Kinematik von starren Maschinen mit starren Massen und idealen Gelenken, aufgebaut. Ein virtuelles MKS-Modell stellt die Basis für das Ausarbeiten und die anschließende Fertigung eines realen Prototyps dar. Sollten sich bei wiederholten Iterationsschritten unzulässig hohe Belastungen oder Schwingungen bestätigen, muss erneut bei der Maßsynthese oder gar bei der Struktursynthese begonnen werden.

### **Ganzheitliche Getriebesynthese**

Nach M. Berger [Ber08] bedient sich die ganzheitliche Getriebeauslegung der umfangreichen Funktionalitäten von CAD- und MKS Softwarelösungen zur effizienten Synthese neuartiger Antriebskonzepte, ausgehend von der Bewegungsaufgabe bis hin zu deren konstruktiver Umsetzung. Mit der geschickten parametergebundenen Verknüpfung der Maßsynthese, der Analyse und der konstruktiven Ausführung in einem ganzheitlichen Ansatz der Getriebesynthese kann eine direkte und engmaschige Optimierung durch iterative Analyse und Parameterverifikation durchgeführt werden. Gezielte Schritte der Struktur- und Maßsynthese, in enger Verknüpfung mit Entwurfsanalysen, führen zu einem immer detaillierterem Modell der gesamten Antriebsbaugruppe. Der zunehmende Einsatz moderner Rechentechnik und komplexer Softwarelösun-

gen führt jedoch zu einer zunehmenden Spezialisierung auf numerische Problemstellungen. Die einhergehende Isolation und Abstraktion von Teilaufgaben und deren Vernetzung in aufwendigen Berechnungsmodellen führt oftmals zu einer Verlagerung der eigentlichen Aufgabenstellungen. Physikalische und mathematische Problemstellungen, sowie der Umgang mit Software, dominieren das Aufgabengebiet und verschließen den Blick auf technologische Zusammenhänge und einfache Lösungen. Das Verständnis und die Berücksichtigung der Prozesstechnologie, als Zusammenspiel der Fertigungseinrichtung mit dem Fertigungsprozess und die vorherrschenden Prozessparameter, sind jedoch entscheidend für die Funktionalität der Fertigungseinrichtung und demzufolge für deren Entwicklung. [Mat02, Nig09]

### **2.1.3 Prozessorientierte Synthesemethodik auf Basis der Technologiesynthese**

Im Innovationsprozess der belastungsgerechten Gestaltung von FV-Werkstoffen für Leichtbauanwendungen und deren automatisierte Serienfertigung, müssen spezielle Textilprodukte und optimierte Fertigungsverfahren zu deren Herstellung entwickelt werden. Diese Textilien sind aufgrund des spezialisierten Einsatzes an umfangreiche technologische Produktvorgaben gebunden, die bei deren Fertigung, hinsichtlich der notwendigen kraftflussgerechten Orientierung sowie der schädigungsarmen Handhabung der Verstärkungsfasern, berücksichtigt werden müssen. Die Umsetzung dieser Vorgaben in einem Fertigungsprozess obliegt mit allen Konsequenzen den Textilmaschinen- bzw. Anlagenherstellern. Dabei stoßen Konstrukteure mit den klassischen Werkzeugen der Mechanismensynthese zur Adaptierung der konventionellen Antriebslösungen durch partielle Optimierung oftmals an die Grenzen des antriebstechnisch und konstruktiv Machbaren. Auch der ganzheitliche Ansatz der Getriebeauslegung kann mit starr vorgegebenen technologischen Anforderungen (Bewegungsaufgabe) oftmals nur zu einem subjektiv optimalen Ergebnis führen. Vor allem durch die strickte Orientierung an bestehenden Fertigungsverfahren und bekannten Bindungsstrukturen eröffnet sich daher ein vergleichsweise geringer Innovationsgrad.

Der Forschungsansatz zur Entwicklung der prozessorientierten Synthesemethodik auf Basis der Technologiesynthese war die Erweiterung des genannten

Innovationsprozesses um die direkte Berücksichtigung der antriebstechnischen Realisierung. Ziel dabei ist die Entwicklung neuer Bindungsstrukturen durch die vordergründige Synthese der zur Herstellung notwendigen Antriebstechnik. Dieser Syntheseprozess erfolgt durch die Kombination der getriebe-technisch optimalen und der technologisch notwendigen Anforderungen. Ausgangspunkt dieser Methodik sind die starr vorgegebenen technologischen Anforderungen eines Textilprodukts und dessen Verwendungszweck. Um gestalterischen Freiraum für die Technologiesynthese zu gewinnen, müssen diese starr vorgegebenen technologischen Anforderungen aufgelockert und hinsichtlich des Verwendungszwecks analysiert werden. Diese Herangehensweise bietet die Möglichkeit, ein neuartiges alternatives Produkt mit äquivalenten oder zweckoptimalen Eigenschaften, unter direkter Berücksichtigung der antriebstechnischen Leistungsfähigkeit, anzubieten. Damit stellt die prozessorientierte Synthesemethodik, basierend auf der Technologiesynthese, eine zielgerichtete und zweckoptimale Vorgehensweise im Innovationsprozess von neuartigen textilen Halbzeugen dar. Unter der Voraussetzung, dass eine bereichsweise Lockerung von starren Vorgaben akzeptiert wird, ist diese Vorgehensweise gleichwertig auf andere Innovationsfelder übertragbar.

Unter der Technologiesynthese ist im vorliegenden Beispiel die kinematische Synthese der neuartigen Verlegetechnik „**D-3F**“ zum Überflechten mit drei Fadensystemen, unter direkter Berücksichtigung von technologischen notwendigen bzw. zulässigen Anforderungen und der dafür notwendigen Antriebstechnik, zu verstehen. Die Minimalanforderung an diese Innovationstechnik ist die grundlegende Studie und Bedarfsanalyse der textilen Prozesskette zur Herstellung von FV-Bauteilen. Mit dieser Grundlage werden existenzielle Synthesevoraussetzung in Form eines Ideenspeichers und der notwendigen Bewertungskompetenz bereitgestellt. Vor allem die bekannten Herstellungsverfahren klassischer textiler Halbzeuge (vgl. **Kapitel 0**) und deren technologische Grundlagen (vgl. **Kapitel 2.4**) sowie antriebstechnische Umsetzung (vgl. **Kapitel 3**) bieten vielfältige Anhaltspunkte und kinematische Lösungskonzepte. Weiterhin können erst mit der grundlegenden Kenntnis der interdisziplinären Zusammenhänge in der textilen Prozesskette zum Aufbau und der Herstellung von FV-Kunststoffen und -Bauteilen (vgl. **Kapitel 2.2**), technologische Anforderungen fundiert hinterfragt und bei Bedarf gleichwertig ersetzt

werden. Zudem eröffnet sich die Möglichkeit neue Bindungsstrukturen mit optimaler Erfüllung der tatsächlich notwendigen Anforderungen unter dem Aspekt des Funktionalisierungspotentials zu gestalten, **Bild 2.6**.

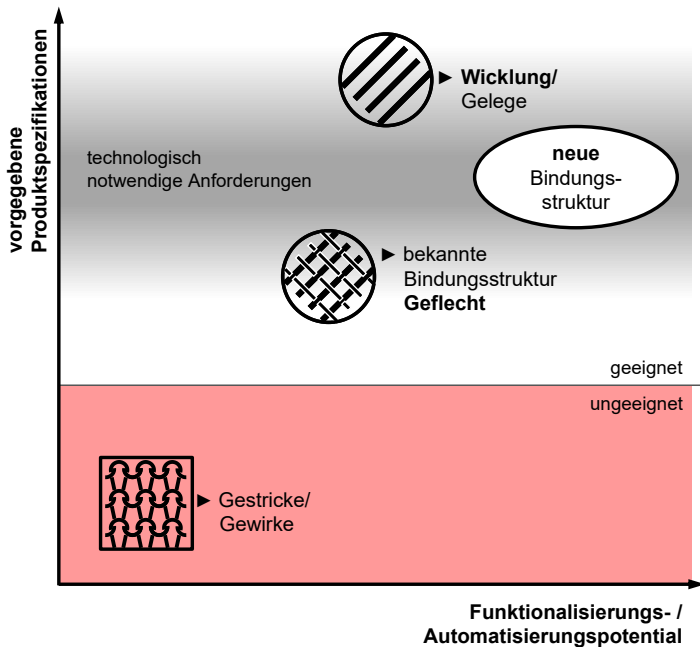


Bild 2.6: Innovationspotential durch Technologiesynthese

Ausgangspunkt der ganzheitlichen und prozessorientierten Synthese, im Gegensatz zur klassischen Vorgehensweise, ist die kritische Studie und Analyse der eingangs festgelegten Anforderungsspezifikationen. Ziel dieser Analyse ist die Isolation der bindungsstrukturunabhängigen Verstärkungscharakteristika und deren Beurteilung hinsichtlich der kinematischen Anforderungen an die Handhabung der Verstärkungsfasern. Vielmals erlauben die eigentlich gewünschten Bindungsstrukturen und Produktcharakteristika ein Auflockern bekannter Bindungsstrukturen und die einhergehende Separierung und Strukturierung der geforderten Bewegungsaufgabe. Mit der Technologiesynthese, als Neukombination der technologischen Anforderungen in einer neuartigen Bindungsstruktur, können die kinematischen Anforderungen direkt qualitativ

hinsichtlich ihrer physikalischen Machbarkeit gestaltet werden. Für die Synthese der Antriebstechnik bietet sich die grundlegende technologische Analyse artverwandter oder ursprünglich vorgegebener Fertigungsverfahren an. Ziel dabei ist die Parameteridentifikation von getriebetechnischen und konstruktiven Anhaltspunkten und deren Beurteilung hinsichtlich der Eignung zur Herleitung der neuartigen Bindungsstruktur. Diese Parameteridentifikation dient wiederum der zielgerichteten Neukombination bekannter Getriebestrukturen unter direkter Berücksichtigung deren inhärenter Eigenschaften und deren potentieller konstruktiver Detaillierung. Die prozessorientierte Synthese stellt eine Erweiterung der ganzheitlichen Getriebesynthese mit dem zielgerichteten Einsatz von CAD- und MKS Funktionalitäten zur direkten Integration der Technologiesynthese dar, **Bild 2.7**. Zur Synthese der Verlegetechnik wurde dabei eine kinematische Prozesssimulation herangezogen und für den kontinuierlichen Parameterabgleich der technologischen, kinematischen, strukturellen und konstruktiven Anforderungen eingesetzt. Dieses Syntheseverfahren kann demnach als interdisziplinäres Verfahren für den Innovationsprozess mit direkter Verknüpfung der technologischen und der antriebs-technischen Umsetzung bezeichnet werden.

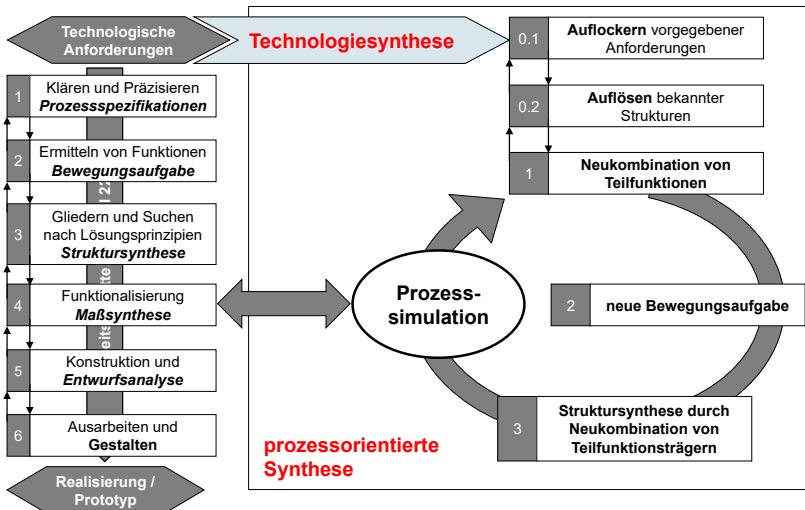


Bild 2.7: Prozessorientierte Synthesemethodik auf Basis der Technologiesynthese

## 2.2 Grundlagen der Faserverbundkunststoffe

### 2.2.1 Faserverbundwerkstoffe

Die Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen beschreiben P. Ermanni [Erm07] oder C. Cherif [Che11] als, im Gegensatz zu den klassischen, metallischen Werkstoffen, inhomogen und in der Regel anisotrop. In einem Werkstoffverbund werden unterschiedliche Materialien zweckorientiert kombiniert, um verbesserte oder neue makroskopische Eigenschaften gegenüber den Ausgangsbestandteilen zu erhalten und unerwünschte Begleiterscheinungen zu beherrschen. Typisches Beispiel hierfür ist die Kombination eines spröden Werkstoffes mit hoher Festigkeit und eines elastischen Werkstoffes mit geringer Festigkeit. Beim Einsatz von FV-Werkstoffen stehen bevorzugt mechanische, physikalische oder ökonomische Aspekte im Fokus. Das nahezu unerschöpfliche Spektrum möglicher Werkstoffkombinationen und Fertigungstechnologien eröffnet Konstrukteuren vielfältige Optionen, um Bauteile und Elemente mit individuellen strukturmekanischen Eigenschaften umzusetzen. Allerdings müssen die mikro- und makromechanischen Einflüsse der Anisotropie bzw. der Inhomogenität, sowie die Volumen- und Gewichtsanteile der Verbundwerkstoffkomponenten schon während der Entwicklung und Auslegung von FV-Bauteilen berücksichtigt werden. Die Aufbereitung dieser Grundlagen erfolgt exemplarisch und aufgabenspezifisch für die Technologiesynthese.

Nach G. W. Ehrenstein [Ehr06] ergibt sich die werkstofftechnische Begründung für den Einsatz von Fasern aus den vier Paradoxa der Werkstoffe:

#### 1. Paradoxon des festen Werkstoffes (F. Zwicky)

*„Die wirkliche Festigkeit eines Werkstoffes ist viel niedriger als die theoretisch berechnete.“ [Ehr06]*

#### 2. Paradoxon der Faserform (A. A. Griffith)

*„Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach höhere Festigkeit als das gleiche Material in kompakter Form, und je dünner die Faser ist, umso größer ist ihre Festigkeit.“ [Ehr06]*

### 3. Paradoxon der Einspannlänge

*„Je kleiner die Einspannlänge, umso größer ist die gemessene Festigkeit einer Einzelfaser.“ [Ehr06]*

### 4. Paradoxon der Verbundwerkstoffe (G. Slayter)

*„Ein Verbundwerkstoff kann als Ganzes Spannungen aufnehmen, die die schwächere Komponente zerbrechen würde. Dabei kann von der stärkeren Komponente im Verbund ein höherer Anteil seiner theoretischen Festigkeit übernommen werden, als wenn sie alleine belastet würde.“ [Ehr06]*

Die Idee des FV-Werkstoffs hat ihren Ursprung in der Natur und ist somit Bestandteil der Bionik. In nahezu allen organischen Konstruktionen der Fauna und Flora kommen Faserverbunde zum Einsatz. Schon frühzeitig erkannte der Mensch das herausragende Potential von Fasern als Konstruktionselement. So diente beispielsweise bereits vor 10.000 Jahren eine Verbindung von Fasermaterial (Holz, Stroh oder Schilf) und Lehm als Baustoff. Heute nutzt beispielsweise K. Götz [Goe00] den optimalen Faserverlauf im Holz von Bäumen zur kraftflussgerechten Ausrichtung von Verstärkungsfasern in FV-Bauteilen.

Im Verlauf des 17. und 18. Jahrhunderts begann die Weiterentwicklung und Vermarktung einer elastischen Masse, die aus milchigen Baumsäften gewonnen wurde. Einen entscheidenden Beitrag leistete Charles Goodyear im Jahre 1841 mit der Entdeckung der Vernetzbarkeit des sogenannten Kautschuks. Im Prozess der Vulkanisation wandelte er, unter Zugabe von Schwefel und dem Einbringen von Wärmeenergie, den Kautschuk in Gummi um. Dieser wurde unter anderem zur Herstellung von Autoreifen verwendet. Verstärkte Kunststoffe wurden im Jahre 1910 von dem Chemiker Bakeland entwickelt. Seine härtbare Formmasse bestand aus Phenol und Formaldehyd und zählt zu der Werkstoffgruppe der Duroplaste. Das sogenannte „Bakelite“ wurde bereits mit kurzen Fasern verstärkt. Der Einsatz von Endlofasern als Verstärkungsstruktur erfordert jedoch eine andere Art von Kunststoff. Die sogenannten Reaktionsharze stehen, aufgrund ihrer chemischen Beschaffenheit, als



reaktives Flüssigharz zur Verfügung. Erst durch die Zugabe von Radikalbildnern wird die Polymerisation angestoßen. Dabei entsteht eine vernetzte duroplastische Matrix. Die flüssige Beschaffenheit der Harze ermöglicht die Zugabe verschiedener Füllstoffe, sowie die definierte Integration von langen Fasern. Mit den Endlosfasern kann die mechanische Festigkeit der ausgehärteten Harze verstärkt werden. Zunächst kam die Glasfaser als Verstärkungsmaterial zum Einsatz. Noch heute stellt der glasfaserverstärkte Kunststoff (GFK) einen wesentlichen Anteil des Weltmarktes an FV-Werkstoffen dar [Win12]. Mit dem Beginn der kommerziellen Produktion von Kohlenstofffasern ab 1971, gewinnt jedoch der kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) als Leichtbauwerkstoff zunehmend an Bedeutung.

Aufgrund der nahezu unerschöpflichen Bandbreite an Werkstoffen und möglichen Kombinationen sowie Fertigungstechnologien [Huf07, Gri07], ist die Entwicklung und Auslegung qualitativ hochwertiger und kraftflussgerechter FV-Bauteile ein komplexer Prozess auf mikro- und makroskopischer Ebene. Neben den Aspekten der Fertigung spielt die Vorhersage der strukturellen Eigenschaften von textilen Halbzeugen oder Preforms, mit dem Ziel der Ableitung von Korrekturfaktoren, eine entscheidende Rolle. Die interdisziplinären Verknüpfungen in der textilen Prozesskette zur Gestaltung und Dimensionierung von FV-Bauteilen sind, unter anderem, Forschungsgegenstand des DFG-Sonderforschungsbereichs „Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen (SFB 639)“ (s. **Bild 2.8**) [DFG15b].



Bild 2.8: Textile Prozesskette der FV-Bauteile [DFG15a, DFG15b, Mod12]

Ein Beispiel für die anwendungsorientierten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist die wirtschaftliche Serienfertigung von belastungsgerechten Halbzeugen oder endkonturnahen Preforms durch das schichtweise Überflechten von formgebenden Kernen. Automatisierte Fertigungskonzepte zur schädigungs-armen Handhabung der Verstärkungsfasern werden unter anderem von K. Birkefeld [Bir13] oder G. Grave [Gra12] vorgestellt.

## 2.2.2 Aufbau von Faserverbundkunststoffen

Faserverbundkunststoffe sind eine Untergruppe der FV-Werkstoffe und gehören grundsätzlich zu den Verbundwerkstoffen. Definitionsgemäß bestehen FV-Werkstoffe aus zwei oder mehreren strukturell verbundenen und im Verbund nicht voneinander lösbaren Materialien.

Faserverbundkunststoffe bestehen in der Regel aus drei verschiedenen Komponenten:

- den **Verstärkungsfasern** mit hoher Festigkeit oder Steifigkeit
- einer individuellen Bettungsmasse (**Matrix**)
- den sogenannten Haftvermittlern (**Interface**)

Nach G. W. Ehrenstein [Ehr06] werden die dominierenden und somit bestimmenden Eigenschaften eines kraftflussgerechten FV-Werkstoffs durch die richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften und die kraftflussgerechte Orientierung der Verstärkungsfasern realisiert. Die meist anisotropen Verstärkungsfasern erfordern eine definierte und exakte Orientierung im Bauteil. In Verbindung mit den Fasereigenschaften bestimmt die Orientierung die späteren mechanischen Eigenschaften im CFK-Bauteil. Wohingegen die Hauptaufgabe der Matrix darin besteht, die Verstärkungsfasern in ihrer Lage zu fixieren und vor Korrosion und Temperatureinflüssen zu schützen, sowie eine Hülle zur Einleitung der äußeren Kräfte in die Verstärkungsfasern zu schaffen. Haftvermittler zählen zu den Schichten, die beim Ausziehen aus den Spindnüssen auf die Verstärkungsfasern aufgebracht werden, um Schädigungen durch Scheuerwirkungen herabzusetzen und die Elementarfasern zusammenzuhalten.

Als „*Bedingung für die Verstärkungswirkung*“ durch Einbetten von Verstärkungsfasern in eine Matrix nennt Ehrenstein [Ehr06] die Voraussetzungen nach Puck:

- die **Verstärkungsfasern** weisen eine höhere Festigkeit und
- eine höhere Steifigkeit als die **Matrix** auf
- die **Matrix ist bruchresistent** gegenüber den Verstärkungsfasern

Das grundlegende Vorgehen bei der Herstellung von FV-Kunststoffen in Laminatbauweise beschreibt P. Ermanni [Erm07]. Demnach werden die Verstärkungsfasern mit einem Kunststoff imprägniert, um nach der Konsolidierung ein formstabiles Bauteil zu erhalten, in dem die Verstärkungsfasern in ihrer Lage fixiert sind. Neben dem Fixieren und Sichern der geometrischen Ausrichtung der Fasern, werden der Matrix weitere Aufgaben zuteil. Dazu zählt mitunter die Ausgestaltung einer Hülle zur Einleitung der äußeren Kräfte in die Verstärkungsfasern, die Realisierung der Kraftübertragung von Faser zu Faser, der Schutz vor Umgebungseinflüssen, Chemikalien und gegen Ausknicken und weiterhin die Gewährleistung der Temperaturbeständigkeit in einem definierten Einsatzfeld.

Die Eigenschaften der Matrix und ihre Eignung zur Funktionserfüllung hängen im Wesentlichen von der Matrixart und den Verarbeitungsbedingungen ab:

- Matrixsysteme aus **Duroplast** entstehen durch die Aushärtungsreaktion eines niederviskosen Mehrkomponentensystems. Durch die Aushärtungsbedingungen während der Wandlung in den hochpolymeren Zustand werden die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Matrix stark beeinflusst. [Erm07]
- Matrixsysteme aus **Thermoplast** entstehen durch Aufschmelzen und anschließendes Erstarren. In dieser Phase können Kristallisations- oder Degradationsphänomene auftreten, die ebenfalls die Eigenschaften der Matrix beeinflussen. [Erm07]

Die Herstellung von FV-Kunststoffen kann grundsätzlich als geordnete oder gemischte Struktur erfolgen. Im Wesentlichen werden die Verstärkungsfasern unter Druck und Temperatur in eine Matrix eingebettet und verfestigt (Konsolidieren). Bei der geordneten Struktur werden die Verstärkungsfasern, wie im **Bild 2.9** dargestellt, von der Matrix in flüssigem Zustand getränkt.

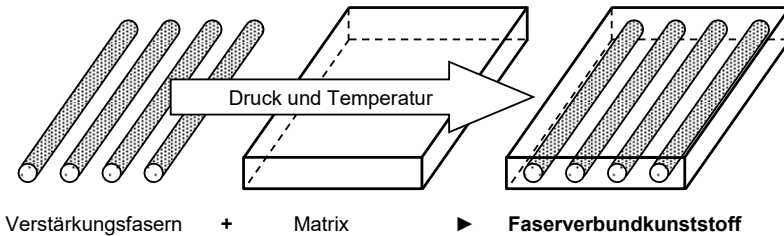


Bild 2.9: Faserverbundkunststoff in geordneter Struktur

In Mischstrukturen (s. **Bild 2.10**) wird die Matrix in Form von Polymerfasern mit den Verstärkungsfasern zusammengefasst und durch Konsolidierung in den Verbundzustand überführt.

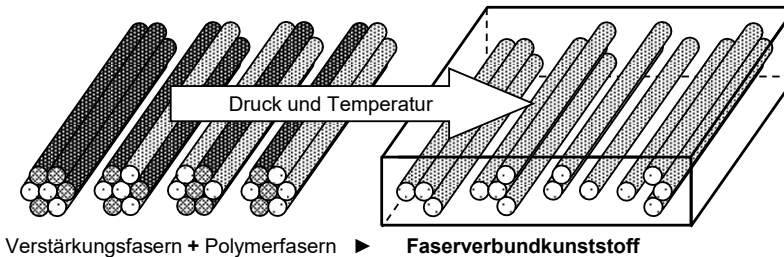


Bild 2.10: Faserverbundkunststoff als Mischstruktur

Für die Auslegung von FV-Bauteilen sind die mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsfasern in Belastungsrichtung entscheidend. Im Zusammenspiel der Materialien hinsichtlich der Schadenstoleranz ist die Steifigkeit, Festigkeit und Bruchdehnung des Matrixsystems ein wesentlicher Faktor. Die

Steifigkeit des FV-Kunststoffs hinsichtlich der Druckfestigkeit definiert sich hauptsächlich über das E-Modul des Matrixsystems. Für das Verhalten bei Schlagbeanspruchung ist die Bruchzähigkeit und Bruchdehnung maßgebend. Vor allem die Bruchdehnung des Matrixsystems verbessert die mechanischen Eigenschaften des FV-Kunststoffs hinsichtlich der Festigkeit und des Energieaufnahmevermögens. Unter Berücksichtigung von Dehnungsvergrößerungseffekten lassen sich die Anforderungen an die Bruchdehnung quantifizieren. Weitere relevante physikalischen Eigenschaften sind die Temperaturbeständigkeit und die klimatische Beständigkeit (sogenanntes Hot/Wet- Verhalten). Das thermische Verhalten eines FV-Kunststoffs ist fast ausschließlich vom Matrixsystem geprägt. Duroplaste und auch Thermoplaste weisen, im Gegensatz zu Verstärkungsfasern, eine deutlich geringere thermische Beständigkeit auf. Das Hot/Wet- Verhalten eines FV-Kunststoffs definiert sich über das unterschiedliche Wasseraufnahmevermögen der verwendeten Werkstoffe. Verstärkungsfasern sind in der Regel diffusionsdicht, das Matrixsystem hingegen nicht. Das Zusammenspiel von Wärme und Feuchtigkeit führt in Verbindung mit der Diffusionsneigung und der einhergehenden Veränderung von Materialeigenschaften zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des FV-Kunststoffs. [Ehr06, Erm07]

### **2.2.3 Verstärkungsfasern**

Nach der DIN 60 000 [DIN60000] sind textile Faserstoffe generell linienförmige Gebilde, die sich textil verarbeiten lassen. Allgemein gilt die Bedingung einer verhältnismäßig großen Länge gegenüber ihrem Querschnitt, sowie einer ausreichenden Festigkeit und Biegsamkeit. Diese Eigenschaften führen dazu, dass ausschließlich Zugkräfte aufgenommen werden können, da textile Faserstoffe bei aufgebrachter Druckbelastung knicken. Textile Faserstoffe sind die Grundbausteine von textilen Flächenelementen bzw. Halbzeugen und bestimmen somit maßgebend deren Eigenschaften (s. Kapitel 2.3.4). Grundsätzlich ist ein Faserkonstrukt fester als ein Konstrukt aus einem kompakten Werkstoff der gleichen Form.

Der Einsatz von Endlosfasern, die das gesamte Bauteil kraftflussgerecht durchziehen und somit eine geringe Anzahl an Lastwechseln der Krafteinleitung zwischen Faser und Matrix zur Folge haben, bewirkt dabei die größtmög-

liche Verstärkungswirkung. Grundsätzlich führt der Einsatz von kraftflussgerecht orientierten Endlosfasern zu einer größeren Verstärkungswirkung gegenüber Kurz- oder Langfaserverstärkungen. Um eine vergleichbare Verstärkungswirkung zu erzielen, ist ein deutlich geringerer Faservolumenanteil, beziehungsweise eine deutlich geringere Anzahl an Verstärkungsfasern, notwendig. [Ehr06, Erm07]

Die Einteilung der textilen Faserstoffe nach der DIN 60 000 [DIN60000] und der DIN 60 001 [DIN60001-1, DIN60001-2] erfolgt nach ihrer Herkunft und stofflichen Beschaffenheit, sowie ihrer Form beziehungsweise Länge. Spinnfasern oder auch Stapelfasern sind Fasern begrenzter Länge. Endlosfasern oder auch Filamente sind Fasern mit praktisch unbegrenzter Länge. Flockfasern oder auch Flock, sind sehr kurze Fasern. Typische Verstärkungsfasern sind Endlosfasern aus Glas, Aramid, Kohlenstoff und Stapelfasern aus natürlichen Rohstoffen. Dünne Fasern zeichnen sich vor allem durch eine deutlich geringere Anzahl an Fehlstellen aus. Durch die bessere Ausrichtung der Moleküle steigert sich zudem ihre Festigkeit. Demgegenüber stehen die niedrige Duktilität und die damit verbundene schlechte Verformbarkeit gegenüber dicken Fasern.

Im **Bild 2.11** ist die große Vielfalt textiler Faserrohstoffe aus natürlichen Fasern (ohne chemische Veränderung, aus pflanzlichen oder tierischen Materialien) und Chemiefasern (synthetisch hergestellt) auszugsweise dargestellt. Als bedeutendste textile Verstärkungsfasern kann nach wie vor die Textilglasfaser angesehen werden. Die Gründe hierfür sind historisch bedingt, rechtfertigen sich jedoch auch aufgrund des Preis-Leistungs-Verhältnisses. Es handelt sich dabei um Fasern mit rundem Querschnitt aus aufgeschmolzenem, gesponnenem Glas.

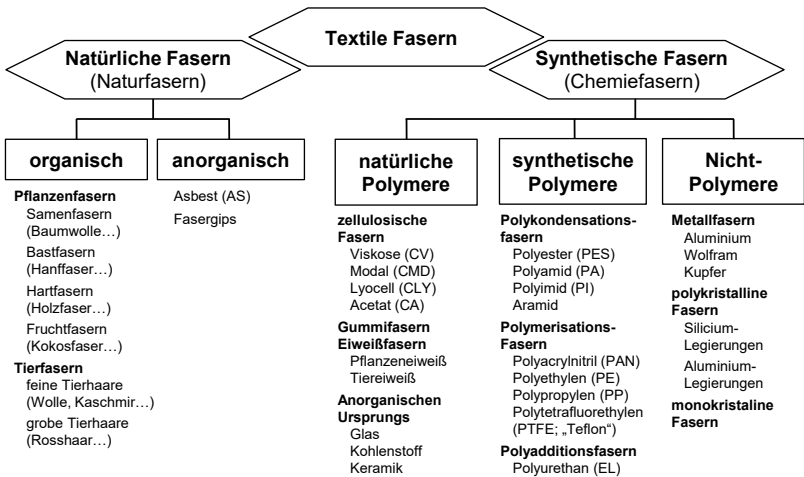


Bild 2.11: Einteilung textiler Faserstoffe [Che11]

Die wesentlichen Eigenschaften der typischen Verstärkungsfasern sind in der folgenden **Tabelle 2.1** aufgeführt.

Tabelle 2.1: Kennwerte der typischen Verstärkungsfasern [Ehr06, Che11]

Faser	Zug			Druck	Dichte	T <sub>max</sub>
	E-Modul	Festigkeit	Dehnung			
	[GPa]	[GPa]	[Prozent]	[GPa]	[g / cm <sup>3</sup> ]	[°C]
Glas (E-Glas)	70-90	2-5	4	k. A.	2,54	300-350
Kohlenstoff (Pan-HM)	400	2,45	0,7	1,6	1,85	600
Aramid	135	3,5	2,8	0,48	1,45	250-300
Stahl	200	2,8	4,8	k. A.	7,8	1000
Polyethylen	172	3,3	4	0,17	0,97	100
Naturfaser (Flachs)	70	0,75	2	- / -	1,48	200

Im Fokus der Hochleistungsanwendungen gewinnt die Kohlenstofffaser zunehmend an Marktanteil. Je nach Ausgangsmaterial kann sie den Chemiefasern aus natürlichen Polymeren (bei der Herstellung aus Pech), den synthetischen Polymeren (bei der Herstellung aus PAN) oder den Naturfasern auf Zellulosebasis zugeordnet werden. Bei der Herstellung werden an den Fasern aus den genannten kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien (Precursor) sämtliche Elemente der Kohlenstoffverbindung thermisch abgespalten und der reine Kohlenstoff wird durch die Orientierung seiner Atome in einen hochfesten Zustand überführt. Die Prozessabfolge setzt sich im Wesentlichen aus einer thermischen Stabilisation, der folgenden Oxidationsreaktion und der finalen Karbonisierung zusammen. Nach den vorherrschenden Temperaturen während der Karbonisierung und der Graphitisierung werden die verschiedenen Arten der Kohlenstofffasern (s. **Tabelle 2.2**) unterschieden. Die einzelnen Fasern sind in der Regel ideal elastisch und spröde. Vor dem Versagen tritt daher nahezu keine plastische Verformung auf. Für die Weiterverarbeitung der Kohlenstofffaser muss zur Vermeidung von Faserbrüchen der materialeigene kritische Biegeradius berücksichtigt werden. [AVK14]

Tabelle 2.2: Kohlenstofffaserarten [Toh15]

Abkürzung	Englische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
HT	High Tenacity	hohe Festigkeit
HM	High Modulus	hohe Steifigkeit
IM	Intermediate Modulus	mittlere Steifigkeit, erhöhte Zugfestigkeit
UHM / UMS	Ultra High Modulus	sehr hohe Steifigkeit
HMS	High Modulus Strength	hochsteif, hochfest



## 2.3 Einordnung der textilen Halbzeuge

### 2.3.1 Technische Textilien

In den folgenden Ausführungen und Abbildungen erfolgt die grundlegende Einordnung der konventionellen textilen Halbzeuge in Anlehnung an C. Cherif [Che11]. Demnach spricht man bei der Verarbeitung von Hochleistungsfasern zu textilen Halbzeugen und Preforms, in zweckorientierter Verbindung mit nicht textilen Materialien, von technischen Textilien. Der Aufschwung der FV-Werkstoffe führte gar zu einer Renaissance der Textilindustrie in den Hochlohnländern. Technische Textilien zeichnen sich meist durch die zielgerichtete Kombination mehrerer Funktionalitäten aus und besitzen dadurch enormes Innovationspotential. Die Einsatzmöglichkeiten sind, aufgrund der großen Bandbreite an Technologien der textilen Prozesskette, ebenso flexibel wie vielfältig in unterschiedlichen Industriezweigen. Technologieträger und Einsatzgebiete sind, neben der Textilbranche selbst, die Automobilindustrie, die Luft- und Raumfahrttechnik [Pur12], das Bauwesen, die Fördertechnik [Rei12] oder verschiedene Gesundheits- und Sicherheitsinstitutionen.

Einzelne Verstärkungsfasern kommen in FV-Bauteilen praktisch nicht zum Einsatz. Vor allem im Hinblick auf Serientauglichkeit erfolgt zumeist eine textiltechnische Verarbeitung von parallel angeordneten Filamenten zu textilen Halbzeugen und Preforms [Met14]. Für den wirtschaftlichen Einsatz von FV-Kunststoffen spielen bis dato die Lamine eine übergeordnete Rolle. Als Laminat wird ein flächiges Produkt bezeichnet, welches aus einzelnen differenzierbaren Schichten besteht und sich unabhängig von der Form eines Bauteils oder dem Fertigungszustand ausprägt. In Abhängigkeit der Komponentenzusammenstellung zählen unterschiedlichste Fertigungsverfahren zum Repertoire der kontinuierlichen Fertigung oder der Einzelanfertigung [Ehr06]. Zunehmend kommen jedoch textile Halbzeuge und Preforms mit kraftflussorientierter Ausrichtung der Verstärkungsfasern zum Einsatz.

Ziel der interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist das Nutzbarmachen des enormen Potentials der Hochleistungsfasern und der wirtschaftlichen Fertigung textiler Halbzeuge. Neben den herausragenden mechanischen Eigenschaften der Hochleistungsfasern ist die Flexibilität von tex-

tilen Gebilden von entscheidender Bedeutung. Die Flexibilität und die gegebenen Kombinationsmöglichkeiten, als Resultat der großen Bandbreite an textiltechnologischen Prozessparametern, erlauben unterschiedliche und zum Teil neuartige Anwendungsgebiete. Von der einzelnen Faser bis hin zum textilen Endprodukt sind unterschiedliche bekannte sowie neu zu erforschende Möglichkeiten der Herstellung, Verarbeitung, Beschichtung oder Modifikation und deren nahezu beliebige Kombination denkbar. Die enorme Flexibilität ist ein wesentlicher Bestandteil des Innovationspotentials der technischen Textilien, im Speziellen in Verbindung mit FV-Konstruktionen und bietet beste Voraussetzungen zur Realisierung bionischer Konstruktionen. Trotz der komplexen Strukturen lohnt sich die Imitation von Vorbildern aus der Natur, da hier eine jahrelange Optimierung und Anpassung durch die Evolution stattgefunden hat. Der zielgerichtete Einsatz und die prozesssichere Kombination von Fasern und Matrix ist der Schlüssel für eine optimale bionische Bauweise.

In Spezialanwendungen ist der Einsatz von FV-Konstruktionen und anderen bionischen Ansätzen längst etabliert. Aufgrund des im Vergleich zu konventionellen Materialien gering ausgeprägten Automatisierungsgrads und den einhergehenden, deutlich höheren Fertigungskosten steht die flächendeckende Überführung zur Serientauglichkeit noch aus. Der Sprung vom Nischenprodukt zur Serienanwendung kann nur über eine drastische Produktivitätssteigerung gemeistert werden. Ein Bestandteil der interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist die faserschonende und automatisierte Fertigung textiler Halbzeuge. Wegen der speziellen Anforderungen an die Verarbeitung von Verstärkungsfasern bei der Herstellung kraftflussgerechter Faserarchitekturen und endkonturnahen Geometrien im textilen Halbzeug, werden bekannte Verarbeitungsprinzipien angepasst und Fertigungseinrichtungen zielgerichtet optimiert. Für die Umsetzung entsprechender Anpassungskonstruktionen kann oftmals auf den reichhaltigen Erfahrungsschatz bestehender Maschinenkonzepte zur Verarbeitung von konventionellen Textilien zurückgegriffen werden.

Die konsequenten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten führen jedoch folgerichtig zur grundlegenden Analyse und Bewertung der bekannten textiltechnologischen Fertigungsverfahren, sowie der konventionellen Anlagentechnik hinsichtlich deren Eignung zur wirtschaftlichen Herstellung von textilen Produkten mit neuartigen Eigenschaften. Um die herausfordernde Zielstellung der ressourceneffizienten Fertigung sowie Variabilität der Formgebung lösen

zu können, muss das Prinzip der Anpassung konventioneller Technologie und Fertigungstechnik in Frage gestellt werden, und das Potential neuer Lösungsprinzipien erschlossen werden.

### 2.3.2 Textile Halbzeuge und Preforms

Das Ausgangsmaterial für textile Halbzeuge oder Preforms sind Faserstoffe, die in linienförmigen textilen Gebilden, den sogenannten Garnen [DIN60905] [DIN60900-1], zusammengesetzt sind. Einfachgarne werden durch form- oder stoffschlüssige Verarbeitungsprozesse zu Garnkonstruktionen, wie gefachten Garnen oder Zwirnen, verarbeitet. In Abhängigkeit zum technologischen Sprachgebrauch wird das Garn oftmals als Faden (z.B. Flechtfaden) bezeichnet. Ein Zwirn wird durch das Zusammendrehen (verzwirnen) von mindestens zwei Garnen hergestellt.

Spinnfasergarne mit theoretisch unbegrenzter Länge werden meist aus kurz-faserigen Naturfasern versponnen, die im Spinnprozess parallelisiert und danach miteinander verdreht werden. Mit der Verdrehung werden die Fasern kraftschlüssig und formstabil verbunden.

Die Filamentgarne umfassen neben den Multifilamentgarnen auch die Monofile. Ein Monofil entspricht einem Filament mit einem Durchmesser größer als 0,1 mm und theoretisch unbegrenzter Länge. Multifilamentgarne bestehen aus mehreren Filamenten, die verdreht oder parallel aufgebaut sind. Nach C. Cherif [Che11] wird für Multifilamentgarne aus Kohlenstofffasern bei Garnfeinheiten größer als 2400 tex der Begriff „Heavy Tow“, und bei Garnfeinheiten von 300 tex bis 2400 tex der Begriff „Low Tow“ verwendet. Im Bereich der Hochleistungsfaserverarbeitung hat sich für Multifilamentgarne der Begriff „Roving“ für Bündel von endlosen, unverdrehten, gestreckten Fasern (Filamente) etabliert. Werden Einzelfilamente aus Glas, Aramid oder Kohlenstoff ohne Drehung zusammengefasst, spricht man zuerst von einem glatten Filamentgarn, und ab einer gewissen Stärke (Feinheit größer 68 tex) von einem Roving. Eine Einteilung in Spinnfasergarne und Filamentgarne wird im **Bild 2.12** gezeigt.

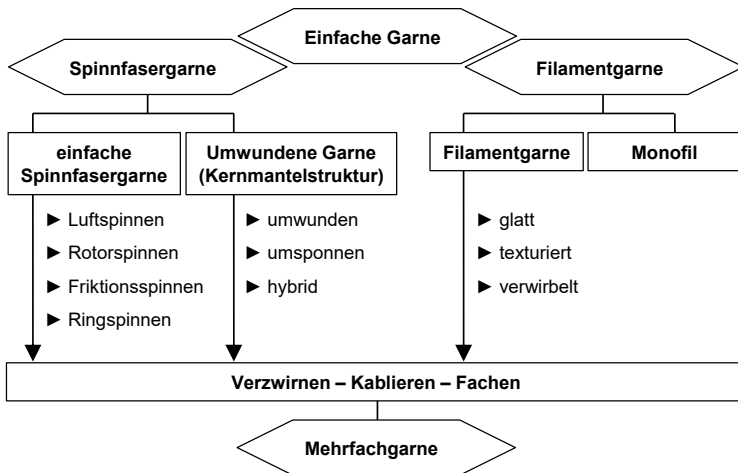


Bild 2.12: Einteilung der Garne [Che11]

Zur Vermeidung von Faserschädigungen müssen bei der Weiterverarbeitung von Garnen die garneigenen Parameter wie Aufbau und Struktur berücksichtigt werden. B. Lehmann und C. Herzberg [Leh11] beschreiben die Abstimmung auf deren textile Verarbeitung und deren Eigenschaften im Verbund als zum Teil widersprüchlich:

- „Besteht das Garn aus Filamenten mit Drehung und damit gutem Fadenschluss, lässt es sich gut textil verarbeiten. Während der Verbundwerkstoffherstellung erschwert die Garndrehung die Imprägnierung mit der Matrix. Im Verbundwerkstoff ist nur eine reduzierte Steifigkeit vorhanden, da das Garn eine Strukturdehnung aufweist. Diese verbessert jedoch die Drapierbarkeit, so dass einfache und auch zum Teil komplexe 3D-Geometrien erzeugt werden können.“ [Leh11]
- „Besteht das Garn aus Filamenten ohne Drehung oder chemischem Haftverbund lassen sich diese schwer textil verarbeiten, aber bei der Verbundwerkstoffherstellung gut imprägnieren. Im FKV resultiert aus der gestreckten Filamentlage der Verstärkungsfasern eine hohe Steifigkeit. Jedoch gibt es keine Strukturdehnung für das Drapieren. Somit sind diese Strukturen vorrangig für 2D-Geometrien geeignet.“ [Leh11]

Die Verarbeitung zu Flächenelementen und räumlichen Halbzeugen, sowie der Folgeprozesse Ausrüstung, Konfektion und Preforming (s. **Bild 2.13**) müssen bezüglich der Herstellung von FV-Bauteilen kontrovers betrachtet werden. Über die integrierten Verstärkungsfasern werden die am Bauteil wirkenden Zugkräfte aufgenommen. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Orientierung der Verstärkungsfasern im FV-Bauteil und somit auch den textilen Halbzeugen und Preforms. Durch die textiltechnologische Verarbeitung sind den unterschiedlichsten zwei- und dreidimensionalen textilen Gebilden charakteristische Bindungen und damit Orientierungsänderungen der einzelnen Verstärkungsfasern auferlegt. Demgegenüber steht die Möglichkeit komplexe textile Gebilde wirtschaftlich herzustellen. Im folgenden **Bild 2.13** ist ein grundlegender Überblick zu den etablierten textilen Flächenelementen und räumlichen Textilgebilden für die Herstellung von FV-Konstruktionen gegeben.

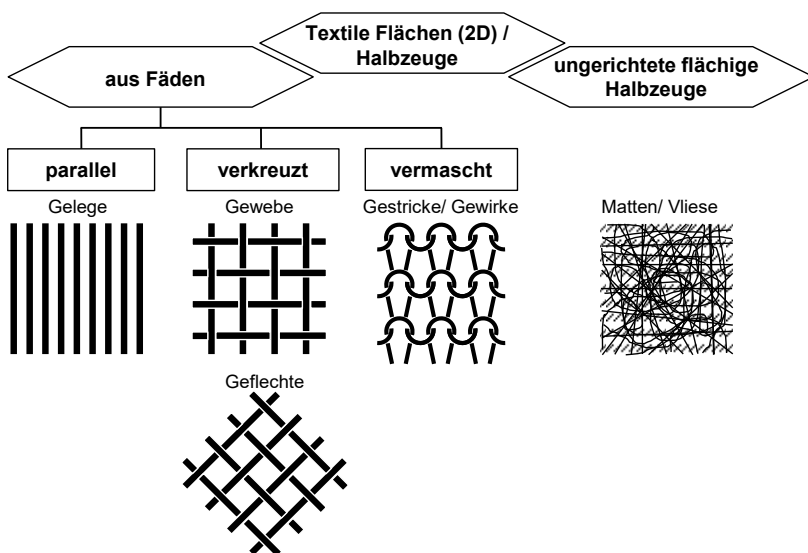


Bild 2.13: Etablierte textile Flächenelemente [Arg79, Che11]

Aus textilen Flächenelementen und räumlichen Textilgebilden werden in unterschiedlichen Schritten der Konfektionierung und des Preformings endkonturnahe Vorformlinge hergestellt. Die stetige Entwicklung zur reproduzierbaren und wirtschaftlichen Fertigung derartiger textiler Halbzeuge für den Leichtbau führte häufig zu Kombinationen und Modifikationen von konventionellen Technologien. Als Beispiele können multiaxiale Gelege oder das Tailored Fiber Placement-Verfahren (TFP) genannt werden.

Als Konfektion bezeichnet man ursprünglich die serienmäßige Herstellung von Kleidungsstücken. In Bezug auf FV-Kunststoffe umfassen konfektionstechnische Prozesse alle Arbeitsschritte zur Fertigung endkonturnaher Preforms aus textilen Halbzeugen, dem sogenannten Preforming. Bereits bei der Planung der Preforms muss die spätere Orientierung der Verstärkungsfasern im FV-Bauteil berücksichtigt werden. Die Auswahl und Kombination geeigneter textiler Halbzeuge sowie deren Integration in das spätere Bauteil sind dabei zu beachten. Speziell beim Montieren und Fixieren der zugeschnittenen Halbzeuge ist die Faltenbildung zu vermeiden. Bei der Gestaltung des Preforms und der Auswahl entsprechender Fixiertechniken müssen die Konsolidierungseigenschaften mit der aufzubringenden Matrix berücksichtigt werden. Die wesentlichen Prozessschritte des Preformings setzen sich aus dem Zugschnitt, der Sicherung der Schnittkanten und dem Fügen (Nähen, Schweißen, Kleben und Bebindern) zusammen.

Nur im idealen Zusammenspiel können Verstärkungsfasern und Matrix optimale mechanische Eigenschaften im FV-Bauteil erzielen. Ein entscheidendes Kriterium dabei ist die Haftung der Komponenten untereinander, welche zudem elementar für die Lastübertragung und die Schadenstoleranz ist. Zur positiven Beeinflussung der Haftung können spezielle Verfahren der Oberflächenmodifizierung gezielt eingesetzt werden. Unter dem Sammelbegriff der Ausrüstung sind Maßnahmen zur Textilveredelung meist direkt nach dem Herstellungsprozess definiert. Ziel der Maßnahmen ist die Aktivierung, Funktionalisierung und Modifizierung der textilen Oberflächen und Grenzschichten. Üblich sind nasschemische Verfahren zur Vorbehandlung und Beschichtung der Verstärkungsfasern, physikalisch/chemische Methoden zur Bearbeitung der textilen Oberflächen und chemische Oberflächenaktivierung und Funktionalisierung durch Behandlung mit Reaktivgas.

Ein Preform ist ein ein- oder mehrlagiges, trockenes textiles Gebilde für die Konsolidierung mit einer Matrix. Die Preforms, oder auch Vorformlinge, erhalten ihre endkonturnahe Geometrie und kraftflussgerechte Struktur in direkten oder sequentiellen Verfahren. Das sequentielle Verfahren setzt sich aus der beschriebenen, zielgerichteten Kombination textiltechnologischer Verarbeitungsprinzipien und Folgeprozessen zusammen. Beim direkten Preforming hingegen werden Verstärkungsfasern direkt zu einem endkonturnahen Preform verarbeitet. Die direkte Verarbeitung der Verstärkungsfasern in nur einem ausgewählten, textiltechnologischen Verarbeitungsprinzip, beispielsweise dem Überflechten, zeichnet sich daher durch eine hohe Prozessstabilität bei geringen Fertigungskosten im Vergleich zu sequentiellen Verfahren aus. Weiterhin entfällt bei der endkonturnahen Fertigung idealerweise die Konfektionierung und es gibt dementsprechend keinen Verschnitt bzw. Abfall. [Bir13]

### 2.3.3 Geometrie und Struktur textiler Halbzeuge

Textilen Halbzeugen und Preforms wird bei der kraftflussgerechten Auslegung von FV-Bauteilen eine tragende Rolle zuteil. Die darin verarbeiteten Verstärkungsfasern sind aufgrund ihrer anisotropen Materialeigenschaften dazu bestimmt, die am Bauteil wirkenden Zugkräfte aufzunehmen. Von entscheidender Bedeutung ist eine möglichst exakte und fehlerfreie Ausrichtung des Fasermaterials in der Faserarchitektur und -orientierung im verwendeten Textil. Mit dieser Ausrichtung werden die geometrische Form sowie die strukturmekanischen Eigenschaft im textilen Halbzeug über den textilen Herstellungsprozess vorgegeben.

Die eindeutige Separierung zwischen geometrischen und strukturmekanischen Eigenschaften kann an dieser Stelle nicht erbracht werden. Vielmehr wird die geometrische Formenvielfalt textiler Halbzeuge mit Hilfe von Beispielen verdeutlicht, **Bild 2.14**. Hier wird zwischen linienförmigen, flächigen oder räumlichen Gebilden unterschieden, wobei die strukturmekanischen Eigenschaften, basierend auf der Bindungsstruktur, weitestgehend unberücksichtigt bleiben:

- 1D-Geometrie beinhaltet biegsame, stabförmige Elemente mit großer Länge im Verhältnis zu ihrem Querschnitt (Filamente, Garne, Rovings etc.)
- 2D-Geometrie bedeutet bei textilen Halbzeugen ein flächiges Element mit geringer Dicke im Bezug zu seinen Flächenabmessungen
- 2 ½D-Geometrien sind 2D-Geometrien, die in eine 3D-Kontur umgeformt wurden
- 3D-Geometrien sind direkt gefertigte Volumenkörper.

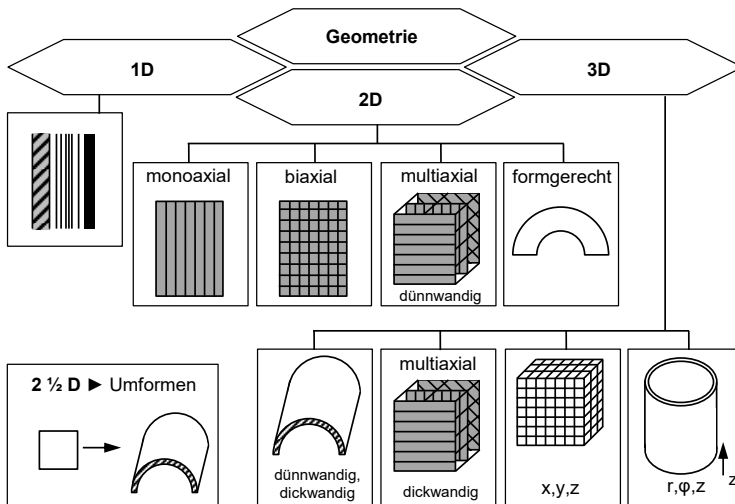


Bild 2.14: Geometrische Form textiler Halbzeuge [Che11]

Die strukturmechanischen Eigenschaften von textilen Halbzeugen lassen sich wiederum in zwei Teilbereiche aufspalten. Man spricht zum einen von der Verstärkungsstruktur auf der sogenannten Makroebene, und zum anderen von der Bindungsstruktur in der sogenannten textilen Einheitszelle auf Mikroebene. [Ehr06] Mit der Verstärkungsstruktur werden die Ausrichtung der Garne und die einhergehenden mechanischen Eigenschaften im textilen Halbzeug charakterisiert. Im Folgenden wird die Verstärkungsstruktur (s. **Bild 2.15**) näher beleuchtet.



- 1D-Verstärkungsstruktur ist gleichbedeutend mit der unidirektionalen Ausrichtung der Garne in Verstärkungsrichtung. Beispielsweise weist das unidirektionale Gelege in Garnrichtung die höchste Verstärkungswirkung bei 2D-Geometrie auf.
- 2D-Verstärkungsstrukturen weisen mind. zwei unterschiedliche Garnrichtungen in meist flächigen Halbzeugen auf. Beispiele für 2D-verstärkte textile Halbzeuge sind biaxiale- oder multiaxiale Gelege, Gewebe oder Geflechte. Der Vorteil gegenüber dem unidirektionalen Gelege liegt in der verbesserten Ausnutzung der Fasereigenschaften durch die Kraftübertragung in mind. zwei Richtungen.
- 3D-Verstärkungsstrukturen zeichnen sich durch Querverbindungen der Garne über die flächige Anordnung hinaus in die dritte Raumrichtung aus. Voraussetzung ist eine 3D-Geometrie im textilen Halbzeug.

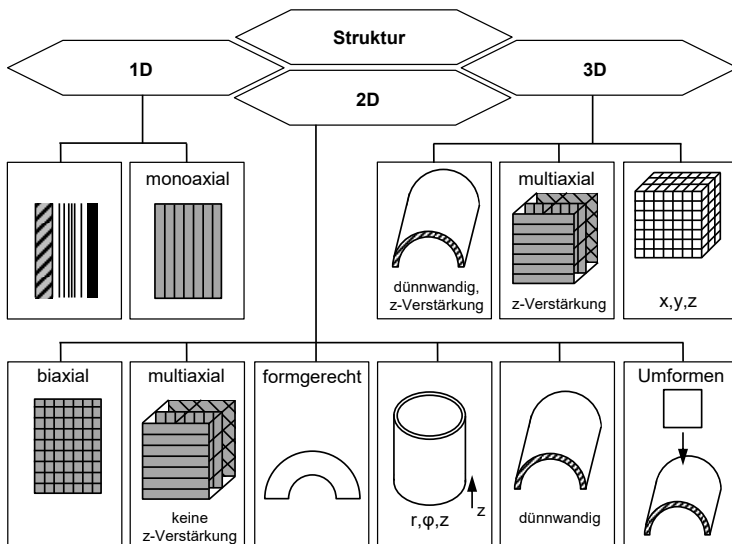
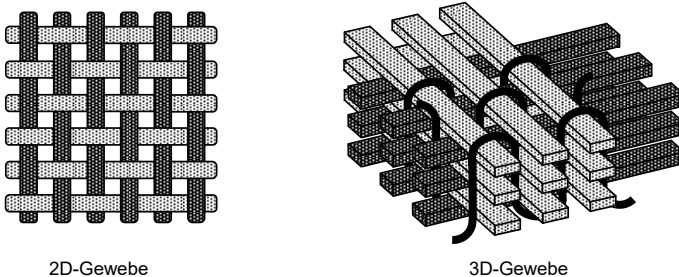


Bild 2.15: Verstärkungsstruktur textiler Halbzeuge [Ehr06, Erm07]

Den Unterschied zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Verstärkungsstrukturen zeigt **Bild 2.16** anhand eines stark abstrahierten Beispiels. Im Gegensatz zur Verstärkungsstruktur wird mit der Bindungsstruktur die Form der Verknüpfung der Garne in der textilen Einheitszelle beschrieben. Häufig anzutreffende Bindungsstrukturen in textilen Flächenelementen sind, wie im Bild 2.13 aufgeführt, vermascht, verkreuzt (gewebeartig) oder parallel liegend (Gelege). Die textiltechnologische Bindungsstruktur ist elementar für die Schadenstoleranz von textilen Halbzeugen und Preforms.



2D-Gewebe

3D-Gewebe

Bild 2.16: 2D-Verstärkungsstruktur contra 3D-Verstärkungsstruktur [Gri14]

### 2.3.4 Auswahl und Eigenschaften textiler Halbzeuge

Nach G. W. Ehrenstein [Ehr06], P. Ermanni [Erm07] und C. Cherif [Che11] spielen bei der Auswahl textiler Halbzeuge oder Preforms für die belastungsgerechte Auslegung von FV-Bauteilen, neben deren rein geometrischer Form, vor allem die mechanischen Eigenschaften und das Drapierverhalten eine entscheidende Rolle. Diese Eigenschaften werden maßgebend durch die inhärente Verstärkungs- und Bindungsstruktur geprägt und können im Wesentlichen über das Verstärkungsmaterial, den Faservolumengehalt, die Faserorientierung und die Faserlänge bzw. Garnstruktur beschrieben werden. Zur Kalkulation der mechanischen Eigenschaften im Auslegungsprozess eines belastungsgerechten FV-Bauteils werden die genannten Charakteristika in Form von idealisierten Materialkenngrößen berücksichtigt. Birkefeld [Bir13] oder H. Schürmann [Scu07] präsentieren einen ausführlichen Überblick der konventionellen Methoden zur Auslegung derartiger FV-Bauteile. Klassische FV-Bauteile entstehen in Laminatbauweise aus schichtweise drapierten, tex-

tilen Flächenelementen (s. Bild 2.13) und werden beispielsweise mit der Laminattheorie, basierend auf der Kirchhoffschen Plattentheorie, berechnet. Der schichtweise Aufbau aus unidirektionalen Gelegen erlaubt das definierte und kraftflussgerechte Ablegen von Verstärkungsfasern, um eine optimale Verstärkungswirkung in einem belastungsgerechten FV-Bauteil zu erzielen.

Die Faserarchitektur eines vermaschten, gewebten oder geflochtenen textilen Halbzeugs führen bei Anwendung der Plattentheorie jedoch zu ungenauen Ergebnissen. Schon beim Fertigungsprozess wirken Belastungen aus den Verarbeitungsparametern und Fadeninteraktionen auf die Verstärkungsfasern ein. Dabei führen reibungsbehaftete Gleitvorgänge der Rovings zur Deformation ihrer Querschnitte aufgrund deren Kompressibilität [Sci12]. Diese Deformation führt in erster Linie zu Querschnittsänderungen des Ausgangsmaterials (Verstärkungsfasern), die die mechanischen Eigenschaften der Halbzeuge, und in Folge dessen die mechanischen Eigenschaften der FV-Bauteile gegenüber der idealisierten Auslegung, verändern. Einen Ansatz zur Berücksichtigung und Abbildung der genannten Phänomene und der physikalischen Effekte bietet die Multiskalen-Modellierung (s. **Bild 2.17**). Dieser Modellierungsansatz unterscheidet zwischen der Mikro-, Meso- oder Makroebene und führt dadurch zu einem gesteigerten Rechenaufwand. In Spezialanwendungen wird die Faserarchitektur durch eine Modellbildung des textilen Fertigungsprozesses charakterisiert [Fin04].

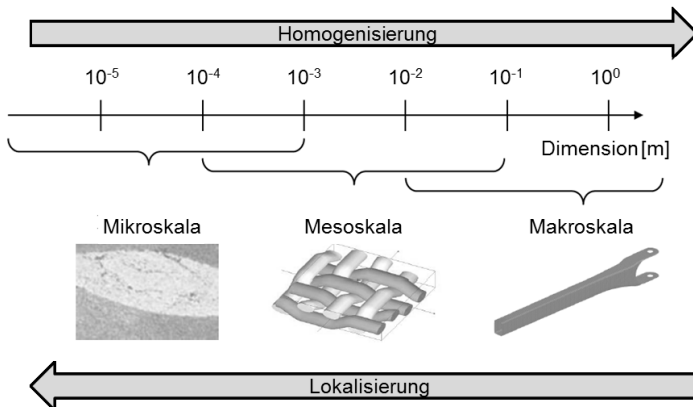


Bild 2.17: Multiskalen-Modellierung [Bir13]

Eine eindeutige Separierung der Skalen ist jedoch aufgrund der komplexen Zusammenhänge nicht möglich. Die Beschreibung der strukturmechanischen Eigenschaften des Bauteils auf Makroebene erfolgt durch die Homogenisierung der gesamten Einheitszelle, ist aber direkt abhängig vom Faservolumenanteil in Richtung oder quer zur Faser. Der Faservolumenanteil, wird wiederum durch die Wahl der Verstärkungsstruktur auf Mesoebene direkt beeinflusst. Die Verstärkungsstruktur beeinflusst die Faserumlenkung und Faserausrichtung der Verstärkungsfasern auf Mikroebene und bildet somit den entscheidenden Faktor für die Zugfestigkeit und Steifigkeit des FV-Bauteils. Im Gegensatz dazu definiert sich die Biegesteifigkeit im Wesentlichen über das verwendete Fasermaterial. Zur Abbildung der Eigenschaften und zur Vorhersage der textilen Struktur wird immer häufiger auf numerische Simulationsansätze zur Prozesssimulation zurückgegriffen. Die Genauigkeit und Aussagekraft sowie die Berechnungszeiten hängen entscheidend vom Detaillierungsgrad und den getroffenen Vereinfachungen ab. Wie etwa N. Modler [Mod11] ein Konzept der integralen Entwicklung endlosfaserverstärkter Bauteile mit Hilfe von virtuellen Prototypen auf Basis numerischer Modelle beschreibt.

Beispielsweise werden die strukturmechanischen Eigenschaften geflochtener Preforms durch die Ondulation (Faserumlenkung), resultierend aus der gekreuzten Bindungsstruktur, entscheidend geprägt. Nicht ondulierte Fasern oder Garne zeichnen sich aufgrund der idealen Belastungsverteilung durch sehr gute Zugfestigkeit und Steifigkeit aus. Im Vergleich zu gewebeartigen Bindungsstrukturen sprechen jedoch der gesteigerte Herstellungsaufwand und die schlechte Drapierbarkeit gegen deren Einsatz [Chr12, Krz14]. Weiterhin ist bei komplexen Profilstrukturen ein Delaminationseffekt, infolge des schichtweisen Aufbaus, wahrscheinlicher als beispielsweise bei überflochtenen Preforms. Je stärker eine Faser durch ihre Bindungsstruktur onduliert ist, desto geringere Belastungen können aufgenommen werden. Allerdings verfügen gewebeartige Bindungsstrukturen über eine vergleichsweise hohe Schadenstoleranz. Durch den Einsatz von UD-Geflechten wird die Faserumlenkung und somit der Einfluss der Ondulation, fast gänzlich vermieden [Wag07, Stu07, Erb09]. Die schematische Darstellung einer ondulierten und einer nicht ondulierten Faser ist dem folgenden **Bild 2.18** zu entnehmen.

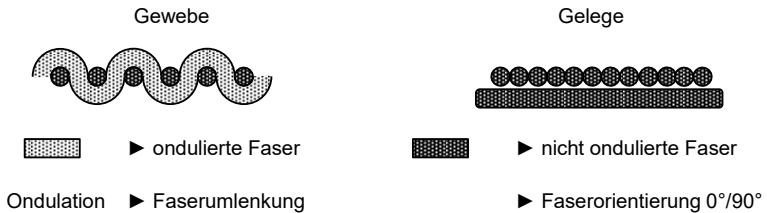
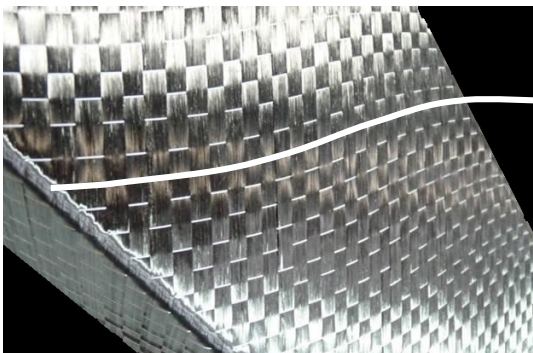


Bild 2.18: Ondulierte Faser und nicht ondulierte Faser

Speziell beim Überflechten von formgebenden Kernen ergeben sich durch reibungsbehaftete Gleitvorgänge der gegenläufigen Flechtfäden untereinander und bei der Ablage auf dem Flechtkern Unterschiede im Ablageverhalten der Flechtfäden auf dem Kern. Bedingt durch die Form des Kerns und die auftretende Reibung zwischen den Flechtfäden und dem Kern selbst, ergeben sich in Summe ungewünschte Querkrümmungen und resultierende Umlenkungen der Flechtfäden. Derartige Querkrümmungen und resultierende Umlenkungen im Flechtmaterial äußern sich zum Beispiel im sogenannten S-Schlag (s. Bild 2.19).



► S-Schlag

Bild 2.19: S-Schlag [Bir13]

Ein textiles Halbzeug ist bei der Weiterverarbeitung zum FV-Bauteil einer Vielzahl an Verformungseffekten durch die Schwerkraft und einwirkenden Hand-

habungskräften ausgesetzt. Speziell bei der Fertigung von FV-Bauteilen werden die Verformungseffekte im Drapiervorgang durch sogenannte Drapierungsmodi beschrieben. Diese Drapierungsmodi beeinflussen lokal den Faservolumengehalt und die Faserorientierung im textilen Halbzeug [Erm07]:

- **„Trellis“-Effekt** wegen der Veränderung der Winkel zwischen den Faserrichtungen durch Scherung bei angreifenden Zugkräften gegen die Hauptrichtung
- **Faserstreckung** aufgrund von Zugbeanspruchung
- **Faltenbildung** durch lokale Schubbeanspruchung
- **Faserdehnung** aufgrund von Elastizitäten der Fasern
- **Verschiebung** der Fasern gegeneinander (Schlupf), oder
- **Verschiebung** von Lagen gegeneinander in Bereichen starker Krümmung

Diese lokalen Änderungen wirken sich insbesondere auf die mechanische Permeabilität und die mechanischen Eigenschaften des FV-Bauteils aus. Weitere Effekte wie Biegung, Verdrillung, Reibung zwischen den einzelnen Fasern und Kompression senkrecht zur Faserrichtung finden auf der Mikroebene in den einzelnen Rovings statt. Der Widerstand gegen diese lokalen Deformationen wird durch die Bindungsstruktur, die Garnstruktur und die Flächendichte des Textils bestimmt und als Verformungswiderstand bezeichnet.

Im Wesentlichen hängt das Drapierverhalten textiler Halbzeuge vom Elastizitätsmodul in Hauptrichtung des Verstärkungsmaterials, dem Schubmodul und der Materialstärke ab. Beim Abformen vorgegebener Konturen muss das Formänderungsvermögen, hinsichtlich des kritischen Biegeradius der verwendeten Rovings, berücksichtigt werden. Für die Vorhersage der Drapierbarkeit und des Verformungswiderstandes der konventionellen Verstärkungsarchitekturen kommen häufig numerische Modelle zum Einsatz. Während die Effekte der Faserdehnung und Faserstreckung in der Regel vernachlässigt werden, findet in den drei folgenden Ansätzen eine Abbildung des Scherverhaltens statt. [Chr12]

## 1. Das Kinematische Modell

*... bildet ein geometrisches Muster, welches die Textilstruktur unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen auf einer Oberfläche darstellt. Es wird das Ablegen des Gewebes auf einer Oberfläche simuliert. Die mechanischen Eigenschaften gehen in die Modellbildung nicht mit ein. Die Kreuzungspunkte werden als Gelenke definiert und durch Balkenelemente mit konstanter Länge verbunden. [Erm07]*

## 2. Das Elastizitätsmodell

*... beschreibt die Textilstruktur mit anisotropem und kontinuierlichem Aufbau. Mit Hilfe geeigneter Diskretisierungsschritte können die Deformationen und die Faserorientierungen numerisch bestimmt werden. [Erm07]*

## 3. Das Teilchen-Modell

*... bildet Wechselwirkungen auf Mikroebene ab, um die Eigenschaften auf der Makroebene formulieren zu können. Dabei wird jeder Kreuzungspunkt der Fasern untereinander von einem Teilchen repräsentiert, welchem die physikalischen Eigenschaften der Verstärkungsarchitektur zugewiesen sind. Für die Teilchenenergie werden Ausdrücke gesucht, die sich durch die Wechselwirkungen benachbarter Teilchen ergeben. Durch Minimierung der Teilchenenergie wird die damit wahrscheinlichste Anordnung der Kreuzungspunkte berechnet. Für diesen Ansatz ist keine Oberfläche zur Ablage des Textils erforderlich. Deformationen durch den Einfluss der Schwerkraft können ebenfalls berücksichtigt werden. [Erm07]*

## 2.4 Technologie des Flechtens

### 2.4.1 Textilprodukte aus verkreuzten Fäden

In der DIN 60 000 [DIN60000] sind die Grundbegriffe der Textilien nach technologischen Gesichtspunkten zusammengefasst. Demnach zählen Geflechte zur Kategorie der gewebeartigen textilen Halb- und Fertigprodukte, die im Gegensatz zu anderen textilen Fertigungsverfahren durch die Verarbeitung offener Garnenden entstehen. Das Geflecht wird als Flächen- oder Körpergebilde mit regelmäßiger Fadendichte und geschlossenem Warenbild definiert. Anders als beim Gewebe verkreuzen sich die biegsamen Flechtmaterialien diagonal zur Produktionsrichtung bzw. zur Warenkante. Die diagonal zur Strukturhauptachse verkreuzten Fäden verleihen dem Geflecht sein hohes Maß an Flexibilität und die damit einhergehende gute Umformbarkeit.

Nach B. Wulforst [Gri14] sind Gewebe textile Flächenelemente, die mittels Fachbildung aus sich rechtwinklig verkreuzenden Fäden entstehen und durch Kraftschluss zusammenhalten. Die benötigten Fäden werden von einem Kettfadensystem und einem Schussfadensystem bereitgestellt. Der resultierende Fadenverlauf bezüglich der Warenkante ist im **Bild 2.20** bezüglich der Warenkante dargestellt und einem Geflecht beispielhaft gegenübergestellt.

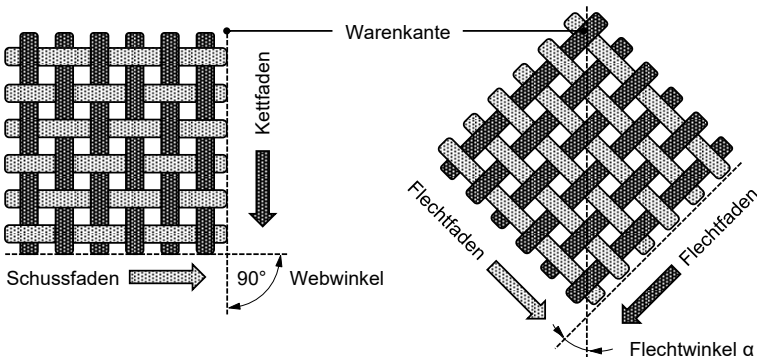


Bild 2.20: Fadenverlauf bei Webprodukten (links) & Flechtprodukten (rechts)

Nach der DIN 60 000 [DIN60000] und DIN 61 100-1 [DIN61100-1] können die genannten Fadensysteme aus mehreren Kett- bzw. Schussarten bestehen.



Beispiele sind die Grund-, Pol- und Füllkette oder der Grund-, Binde- und Füllschuss. Im einfachsten Fall bestehen Grundgewebe aus nur einer Kett- und Schussart, weshalb sich die Begriffe „Kette“ und „Schuss“ durchgesetzt haben. In der Regel handelt es sich bei Geweben um flächige Strukturen, bei der Verwendung mehrerer Fadensysteme sind mehrlagige oder räumliche Strukturen möglich.

Als Kettfadensystem bezeichnet man die koaxial zur Warenkante ausgerichteten Fäden. Sie verlaufen vom Kettbaum über den Streichbaum durch die Webfachbildungsvorrichtung (Litzen oder Schäfte) bis zum Warenbaum. In der Webfachbildungsvorrichtung werden die Kettfäden auf und ab bewegt und die Fächer ausgebildet, die das Passieren der Schussfäden ermöglichen. Das Kettfadensystem ist im Zusammenspiel mit dem Schussfadensystem das aktive Fadensystem.

Als Schussfadensystem bezeichnet man die in Warenquerrichtung verlaufenden Fäden. Mit Hilfe des Schussfadeneintragssystems werden sie von der einen Webkante zur anderen durch das ausgebildete Fach eingebracht. Das Schussfadensystem ist demzufolge das passive Fadensystem.

## 2.4.2 Aufbau und Struktur von Geflechten

Wie bereits von B. Lepperhoff [Lep53] und H. Engels [Eng94] beschrieben, besteht die einfachste Form des Geflechts aus drei zyklisch verkreuzten Garnen. Beim Handflechten mit drei Garnen (s. **Bild 2.21**) wird, von rechts beginnend, der äußere Faden „1“ über den mittigen Faden „2“ gelegt.

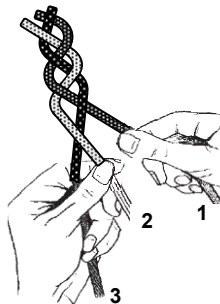


Bild 2.21: Handflechten mit drei Garnen [Gri14, Ill15]

Im nächsten Schritt muss der linke äußere Faden „3“ über den mittigen Faden „1“ gelegt werden. Bei zyklischer Wiederholung der Schritte entsteht ein Geflecht und die charakteristische Handbewegung in Form einer Acht kann als technologiebedingter Bewegungsverlauf nachvollzogen werden. Das Muster, welches durch die Grundschritte erzeugt wird, bezeichnet man als Rapport. Das gesamte Flechtprodukt besteht also aus einer Vielzahl aneinandergereihter Rapporte. Beim maschinellen Flechten werden meist mehrere Fäden verwendet. Dann wird der Rapport erst nach entsprechend vielen Schritten erreicht.

Nach E. Laourine [Lao11] kann die Bindungsstruktur des Geflechts anhand mehrerer Größen beeinflusst und bewertet werden. Im Einzelnen sind dies die Anzahl der Flechtfäden, der Flechtwinkel, die Flechtdichte, die Bindungsart und die Fachung. Grundlegend wird nach der Orientierung und Anzahl der eingesetzten Fadensysteme in biaxiale und triaxiale Bindungsstruktur unterschieden. Das einfache, biaxiale Geflecht besteht aus den eigentlichen Flechtfäden, die lediglich in zwei wesentlichen Fadenorientierungen abgelegt werden. Beim Auseinanderziehen verhält sich ein biaxiales Flechtprodukt elastisch, wobei die resultierende Längenänderung eine gleichzeitige Änderung des Querschnitts zur Folge hat. In einem triaxial aufgebauten Flechtprodukt wird diesem Effekt durch das Einbringen von Stehfäden (oder auch Zettelfäden) in  $0^\circ$ -Orientierung gegenüber der Abzugsrichtung entgegengewirkt. Dadurch zeichnen sich triaxiale Geflechte durch eine erhöhte Formstabilität gegenüber den biaxialen Geflechten aus. Im folgenden **Bild 2.22** sind beide Geflechtarten vergleichend gegenübergestellt.

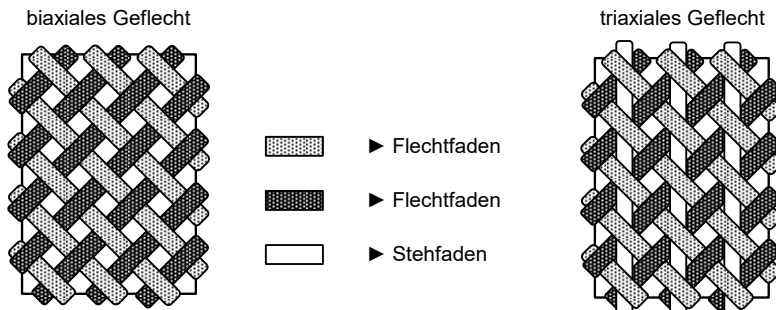


Bild 2.22: Biaxiales Geflecht (links) und triaxiales Geflecht (rechts)

Exemplarisch definiert Y. Kyosev [Kyo15] oder J. U. Rosenbaum [Roe91] den Flechtwinkel zur Beschreibung der Fadenorientierung der verflochtenen Fäden im Flechtprodukt. Gemessen wird gegenüber der Längsachse des Geflechts bzw. der Richtung der Abzugsbewegung. Theoretisch liegt er zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , während in der Praxis ein Bereich von ca.  $20^\circ$  bis  $80^\circ$  angegeben wird. Betrachtet man den Flechtwinkel  $\alpha$  eines Flechtfadens rein geometrisch in einem zylindrischen Geflecht mit bekanntem Zylinder-/Schlauchradius  $R$ , so lässt sich ein direkter Zusammenhang mit der Schlaglänge  $H$  oder der Flechtfadenlänge  $L$  ableiten. Im **Bild 2.23** sind die geometrischen Zusammenhänge der Schraubenlinie eines Flechtfadens im Geflecht und in die Ebene abgewickelt dargestellt.

$$\tan \alpha = \frac{2 * \pi * R}{H} \quad (2.1)$$

$$\cos \alpha = H/L \quad (2.2)$$

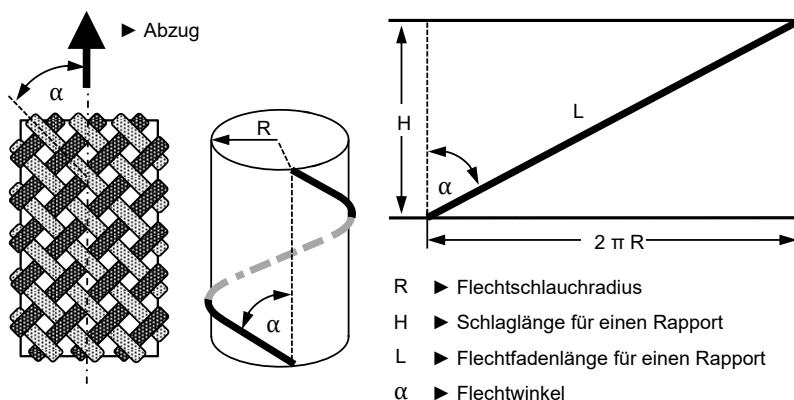


Bild 2.23: Flechtwinkel

Die Flechtdichte **FD** - oder auch Bedeckungsgrad - ist abhängig von der Anzahl der Flügelräder **N<sub>FR</sub>**, der Flechtfadenbreite **b<sub>FF</sub>**, dem Zylinderradius **R**

sowie dem Flechtwinkel  $\alpha$  und wird zum Beispiel von A. Rawal [Raw05] kalkuliert. Sie beschreibt die Anzahl von Verflechtungen auf einem Längenabschnitt und wird in der Regel über die Produktspezifikation vorgegeben. In Verbindung mit dem Schlauchvolumen und dem neutralen Flechtwinkel von  $54,44^\circ$  [Hec05] bildet die Flechtdichte ein entscheidendes Kriterium zur Berechnung und Auslegung von Flechtschläuchen im Hydraulikbereich oder auch der Elektrotechnik. Unabhängig vom Schlauchradius zeichnet sich der neutrale Flechtwinkel durch die höchstmögliche Volumenüberdeckung des Flechtschlauches aus.

$$FD = 1 - \left( 1 - \frac{b_{FF} * N_{FR}}{4 * \pi * R * \cos \alpha} \right)^2 \quad (2.3)$$

Das Verkreuzen der Flechtfäden und die resultierende Bindung des Flechtprodukts werden in der sogenannten Bindungslehre systematisiert. Die Bindung des Flechtprodukts beschreibt die Form der Verknüpfung der Garne in der textilen Einheitszelle auf Mikroebene und hat maßgeblichen Einfluss auf die strukturellen Eigenschaften, als auch auf die Schadenstoleranz. Ein einzelner Flechtfaden im Flechtprodukt verläuft regelmäßig über und unter dem gegenläufigen Flechtfaden und weicht somit von der optimalen geradlinigen Ausrichtung ab (s. Bild 2.18). Durch das kontinuierliche Abbinden der Fasern untereinander wird im Schadensfall eine örtliche Delamination begrenzt und zusätzlich das verdeckte Ausbreiten eines Schadens verhindert. Die gebräuchlichsten Bindungsarten werden am Beispiel handelsüblicher Klöppelflechtmaschinen nach dem Gangbahn-Flügelrad System (oder auch Maypole-Braider) im **Bild 2.24** gezeigt. Abhängig von der Besetzung beziehungsweise Ausgestaltung der Flügelräder sind 2-flechtige (Regular Braid [Gri14] oder 2 über 2), 1-flechtige (Diamond Braid [Gri14]) oder 4-flechtige Bindungen gebräuchlich. Am verbreitetsten ist die 2-flechtige Bindung, bei der mit einer normalen Besetzung der Flügelscheiben mit vier Flügeln geflochten wird. Jeder Flechtfaden verläuft dabei regelmäßig über und unter zwei gegenläufigen Flechtfäden. Die Herstellung einer 4-flechtigen Bindung erfordert modifizierte Flügelräder mit zusätzlichen Flügeln. Diese Bindung 4 über 4 weist eine verminderte Ondulation gegenüber der 1- oder 2-flechtigen Bindung auf, da der Flechtfaden erst alle vier Fäden von seiner Ausrichtung abweicht.

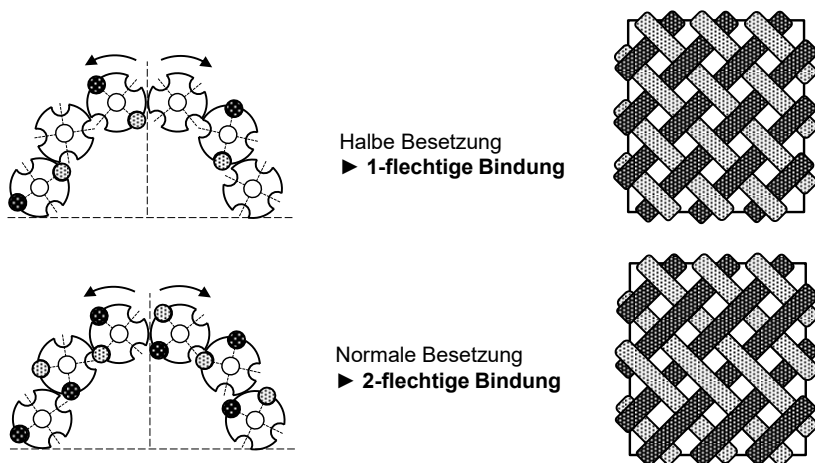


Bild 2.24: Bindungsarten einer Klöppelflechtmaschine [Gri14]

Eine weitere charakteristische Größe wird mit der sogenannten Fachung beschrieben. Unabhängig vom Bindungstyp beschreibt die Fachung die Anzahl an zugeführten Flechtfäden pro Klöppel (Vorrichtung zur Aufnahme der Flechtfadenspeicher). Für eine doppelte Fachung muss ein Klöppel für die Aufnahme von zwei Flechtfadenspeichern (Spulen) ausgerüstet sein, um zwei Garne parallel abziehen und verarbeiten zu können. Im **Bild 2.25** ist eine einflechtige Bindung mit doppelter Fachung dargestellt.

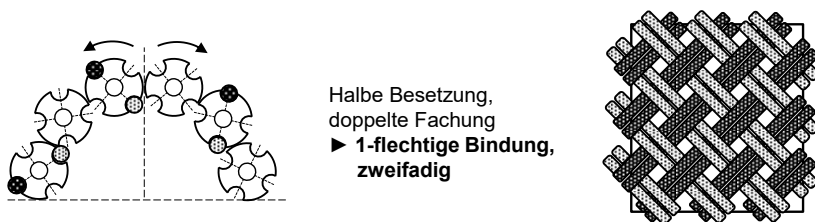


Bild 2.25: Einflechtige Bindung mit doppelter Fachung [Gri14]

### 2.4.3 Halbzeuge und Preforms durch Überflechten

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 erläutert, sind die strukturellen Eigenschaften ebenfalls von der Faserarchitektur auf Makroebene abhängig. Nach E. Laourine [Lao11] oder B. Wulfhorst [Gri14] findet eine Einteilung in Geflechte mit 2D-Verstärkungsstruktur und 3D-Verstärkungsstruktur statt. Trotz der meist dreidimensionalen Geometrie eines 2D-Geflechts ist eine eindeutige Unterscheidung durch die Fadenablage möglich. 2D-Geflechte werden im Rundflechtverfahren hergestellt und können grundsätzlich als Rund-, Flach- und Hohlgeflecht mit oder ohne Flechtkern bzw. Flechtseele ausgeführt werden. Von besonderer Bedeutung für die Fertigung textiler Halbzeuge ist der Einsatz von formgebenden Flechtkernen. Im Speziellen zur Herstellung endkonturnaher Preforms kommt dabei ein eigensteifer Flechtkern zum Einsatz, der die gewünschte Bauteilgeometrie vorgibt (vgl. auch [Geß12, Bir13]). Durch das Zusammenziehen des Geflechts auf der Oberfläche wird der Kern durch Reibung fixiert.

Ein Flachgeflecht wird typischerweise auch als Litzengeflecht bezeichnet und besteht aus nur einem Fadensystem. Beim Flechtvorgang verkreuzen sich alle Fäden diagonal zueinander und prägen Warenkanten durch Richtungs-umkehr an den Kanten aus.

Das Rundgeflecht zeichnet sich durch einen runden oder ovalen Querschnitt aus und besteht aus zwei Fadensystemen. Hohle Rundgeflechte sind nur mit bis zu 16 Flechtfäden herstellbar, da ansonsten eine Forminstabilität zu erwarten ist. Typische Produkte sind Seile, Kordeln, Kabel aus der Elektrotechnik oder früher auch Riemen (die für die Bezeichnung der Flechtmaschinen als „Riemengang“ verantwortlich sind [Lep53]). Auch beim Überflechten handelt es sich um Rundflechtprodukte. Der Flechtkern kann ein- oder mehrschichtig, um- oder überflochten werden und gibt die geometrische Form des Geflechts vor.

Echte 3D-Geflechte zeichnen sich jedoch durch eine Fadenablage mit Querverbindungen aus. Dabei können die Flechtfäden selbst ein Volumen aufbauen und weisen eine dreidimensionale Verstärkungsstruktur auf. Der Unterschied zwischen 2D-Flechtstrukturen und 3D-Flechtstrukturen ist im **Bild 2.26** am Beispiel von Rundgeflechten dargestellt.

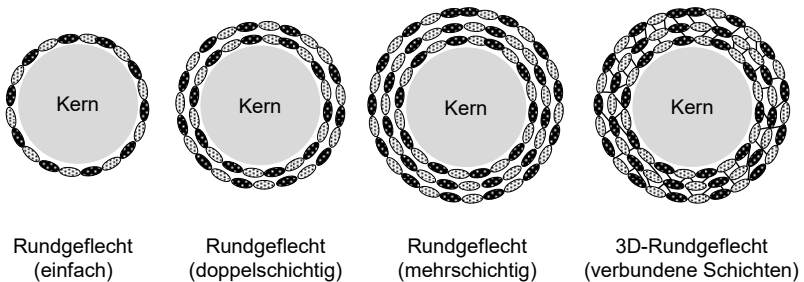


Bild 2.26: Zwei- und dreidimensionales Um- bzw. Überflechten [Che11]

3D-Geflechte sind von W.-A. Büsgen [Bue93] wie folgt systematisiert:

- **Profilförmige dreidimensionale Geflechte**, mit kompakten Profilen ohne Veränderung des Querschnitts
- **Bauteilförmige dreidimensionale Geflechte**, durch individuell steuerbare Flechtfäden können direkt bauteilförmige Flechtprodukte erzeugt werden
- **Mehrschichtige Rundgeflechte**, durch das schichtweise Überflechten von Kernen, mit oder ohne Verbindung der Schichten, sind Querschnittsänderungen unter Berücksichtigung physikalisch-geometrischer Gesetzmäßigkeiten (Grad der Konvexität, Konkavität oder des Öffnungswinkels am Kegel) möglich

Nach der Dissertationsschrift von Birkefeld [Bir13] und einer Vielzahl weiterer Publikationen [Wag07, Erb09, Pic09a] bietet das Flechtverfahren hervorragende Voraussetzungen zur wirtschaftlichen Serienfertigung von belastungsgerechten Halbzeugen oder endkonturnahen Preforms. Durch das schichtweise Überflechten von formgebenden Kernen mit über die Länge des Kerns variierenden exzentrischen Querschnitten, Krümmungswechseln, Wendestellen etc. wird die vergleichsweise hohe Faserablagerate der Flechttechnik mit einem gleichzeitig großen geometrischen Fertigungsrepertoire ideal kombiniert. Entscheidender Faktor ist die Bindungsstruktur des Geflechts, die gegenüber dem reinen Gelegeaufbau zu verbesserten strukturellen Eigenschaften mit hoher Schadenstoleranz führt [Pot03, Pot06, Akk06]. Unter

anderem wurde von M. Lengersdorf [Len14] für die Herstellung von faserverstärkten Druckbehältern das Flechten mit dem Wickeln verglichen. Demnach ist das direkte Überflechten, unter Berücksichtigung einschränkender Parameter, aufgrund der strukturellen Eigenschaften als Ersatz für das Wickeln geeignet.

Das Potential der serientauglichen Fertigung von profilartigen Preforms durch Überflechten, auf Rundflechtmaschinen oder den eigens zur Verarbeitung von Kohlenstofffaser Rovings entwickelten Radialflechtmaschinen wird durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Bei endkonturnaher Fertigung entfällt idealerweise die Konfektionierung und es entsteht dementsprechend kein Verschnitt bzw. Abfall.
- Die Rovings werden direkt in einem textilen Fertigungsverfahren zu Preforms verarbeitet. Dadurch zeichnet sich die Herstellung geflochtener, profilartiger Preforms durch eine hohe Prozessstabilität bei geringen Fertigungskosten aus.
- Die Flechtfadenablage erfolgt definiert auf inkonstanten Kernquerschnitten und erlaubt gestalterische Freiheiten wie integrierte Elemente, Sprünge, Kegel, Krümmungen, asymmetrische Querschnitte und Ausbuchtungen.
- Das Überflechten ermöglicht die Herstellung von Preforms mit variablen und flexibel einstellbaren Querschnitten und annähernd freier Formgebung sowie Krümmungen.
- Komplexe Profilstrukturen sind ohne Delaminationseffekte realisierbar.



Um das genannte Potential bestmöglich ausschöpfen zu können, sind bei der Preformherstellung technologische Parameter zu beachten. Diese werden ebenfalls in „Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten“ von Birkefeld [Bir13] zusammengefasst:

- Es liegen Grenzen der Formgebung bei Profilen mit konkaven Querschnitten oder sehr großen Querschnittsänderungen vor.
- Die Formgebung ist stets an den Einsatz eines entsprechenden Flechkerns gebunden.
- Nicht rotationssymmetrische Flechkernquerschnitte führen zum sogenannten S-Schlag, einer Abweichung vom eingestellten Flechtwinkel.
- Die Anzahl an Geflechtschichten ohne Querverbindungen erhöht die Wahrscheinlichkeit von Faltenbildung oder Verrutschen.
- Die Verstärkungswirkung des fertigen Leichtbauteils hängt stark von der Faserorientierung und somit vom Flechtwinkel ab. Dieser ist üblicherweise im Bereich von  $20^\circ$  -  $80^\circ$  einstellbar.
- Das Flechtverfahren verfügt im Allgemeinen über einen relativ geringen Vorrat an Flechtmaterial. Die sogenannten Klöppel müssen daher regelmäßig neu bestückt werden.



### 3 Antriebstechnische Umsetzung der Flechtverfahren

#### 3.1 Einordnung der Flechtmaschinen

Hauptaufgabe der Maschinentechnik ist die Realisierung des technologiebedingten Bewegungsverlaufs zur Handhabung der Flechtmaterialien entsprechend der geforderten Bindung. Dieser technologiebedingte Bewegungsverlauf wird im weiteren Verlauf auch als Verlegebewegung bezeichnet. Für die maschinelle Realisierung dieses Prinzips wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Flechtmaschinen für unterschiedliche Produktkonfigurationen und zu verarbeitende Flechtmaterialien entwickelt.

Die in Kapitel 2.4.2 getroffene Einteilung der Geflechte hinsichtlich ihrer Verstärkungsstruktur und der zugehörigen Unterscheidung zur reinen geometrischen Form entspricht einer einheitlichen Systematisierung der Flechtverfahren und der zugehörigen maschinentechnischen Umsetzung. Ein 2D-Geflecht wird maschinentechnisch über zwei freie Parameter, den Abzug und der vorgegebenen Verlegebewegung, ein 3D-Geflecht hingegen über mindestens drei freie Parameter, den Abzug und variable Verlegebewegungen, realisiert. Die Einteilung der verschiedenen Verfahren ist im **Bild 3.1**, unabhängig des vorherrschenden Antriebskonzepts zur Erzeugung der Verlegebewegungen, getroffen.

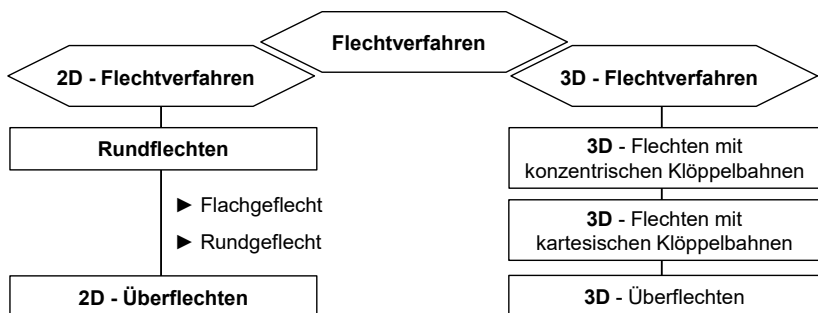


Bild 3.1: Systematisierung der Flechtverfahren [Gri14]

Eine deutlich ausführlichere Zuordnung der Flechtverfahren, der zugehörigen Maschinentechnik und der Flechtprodukte wird von Kyosev [Kyo15] gezeigt. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt jedoch auf der Verarbeitung von Verstärkungsfasern für den Einsatz in Faserverbundkonstruktionen, im Speziellen der Preformherstellung durch Überflechten.

Einschlägige Lehr- und Fachbücher der textilen Herstellungsverfahren - insbesondere der Flechttechnik - (vgl. [Lep53, Roe91, Bue93, Eng94]) behandeln in der Regel nur die konventionellen Rundflechtmaschinen (oder auch Maypole-Braider / Klöppelflechtmaschinen) nach dem Gangbahn-Flügelrad System, respektive den darauf basierenden Spezialmaschinen [Hon14]. Die sogenannten Rotor- oder Schnelflechtmaschinen – beispielsweise Hebelflechtmaschinen nach dem System „Horn“ - sind ebenfalls den Rundflechtmaschinen zu zuordnen, bleiben jedoch nach Auswertung der Quellen nahezu unberücksichtigt. Demnach findet auch keine Gegenüberstellung zur Beschreibung, Analyse und Bewertung der Rundflechtverfahren statt. Um die Vor- und Nachteile der Flechtsysteme hinsichtlich der Parameteridentifikation zu ergründen, wird in den folgenden Kapiteln zunächst die Funktionsweise und die prozessrelevanten Baugruppen der Flechtvorrichtungen nach dem Gangbahn-Flügelrad System beschrieben und im Kontext der gesetzten Zielstellung analysiert.

## **3.2 Flechtmaschinen nach dem Gangbahn-Flügelrad System**

### **3.2.1 Verlegetechnik und Funktionsweise der Rundflechtmaschinen**

Zur Fertigung von 2D-Flechtstrukturen kommen Rundflechtmaschinen mit produktspezifischer Konfiguration und Ausstattung zum Einsatz. Im folgenden **Bild 3.2** wird die prinzipielle Funktionsweise der Rundflechtmaschinen, basierend auf dem Gangbahn-Flügelrad System, gezeigt. Das Flechtmaterial wird von den Spulen mit möglichst definierter und konstanter Fadenspannung abgezogen. Die Spulen sind in den Klöppeln um ihre Längsachse drehbar gelagert, um die Flechtfäden abziehen zu können. Diese Trägervorrichtungen stellen zum einen die Schnittstelle zwischen den bewegungsübertragenden

Bauteilen und dem Flechtmaterialspeicher dar, zum anderen wird die Anordnung der Spulen hinsichtlich der Maschinenhauptachse gesichert. Das Geflecht zieht sich im sogenannten Flechtpunkt zusammen, der sich natürlich über das Verhältnis der Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung zur Abzugsgeschwindigkeit des entstandenen Flechtprodukts ergibt. Mit steigender Abzugsgeschwindigkeit vergrößert sich der Abstand des Flechtpunkts zum Flechtbett. In der Regel wird über die Abzugsbewegung der Flechtwinkel gesteuert. Je schneller bei gleichbleibender Flechtgeschwindigkeit abgezogen wird, desto kleiner ist der Flechtwinkel. Zur Formgebung des Geflechts oder zur Überwachung der Fadenabzugsspannung werden Fadensammler (Scholle, Schöllchen, Schälchen) kurz unterhalb des Flechtpunkts befestigt.

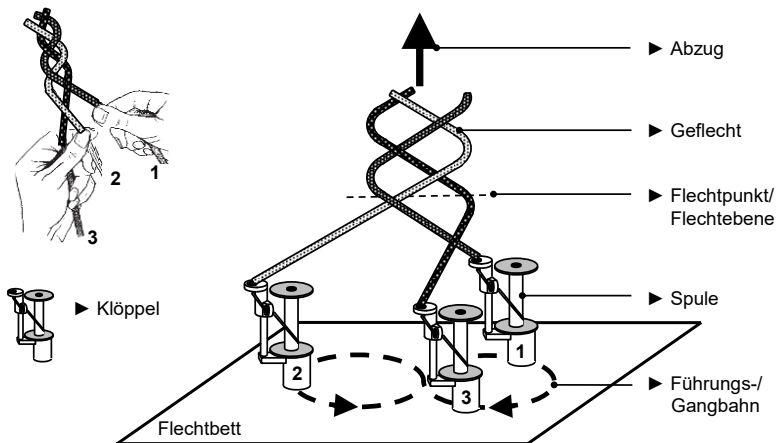


Bild 3.2: Prinzipielle Funktionsweise einer Flechtmaschine

Wie bereits von B. Lepperhoff [Lep53] und H. Engels [Eng94] beschrieben, setzt sich das Antriebskonzept zur Erzeugung des technologiebedingten Bewegungsverlaufs der Klöppel im Wesentlichen aus den Flügelrädern (s. **Bild 3.3**), der Gangbahn und den Klöppeln selbst zusammen. Die Führungs-, Gleit- oder Gangbahn ist bei zwei direkt benachbarten Flügelrädern, entlang der Kontur der Flügelscheiben aus halbkreisförmigen Elementen in Form einer liegenden Acht, (s. Bild 3.2), auf dem sogenannten Flechtbett ausgeprägt. Ein Flügelrad setzt sich prinzipiell aus der kreisförmigen Flügelscheibe, einer Radbüchse und einem Stirnrad

zusammen. Flügelscheibe und Stirnrad sind über die Radbüchse starr verbunden und auf den gestellfest und kreisförmig auf der Unterplatte angeordneten Radpfeilern (s. **Bild 3.4**) derart drehbar gelagert, dass die Stirnräder benachbarter Flügelräder im Eingriff stehen. Der Achsabstand der Radpfeilmittelachse entspricht der Länge des sogenannten Stiches. Die Flügelscheiben verfügen über radiale Ausschnitte - die sogenannten Flügel - zur Aufnahme und Übergabe der Klöppel an den Kreuzungspunkten der Gangbahn.

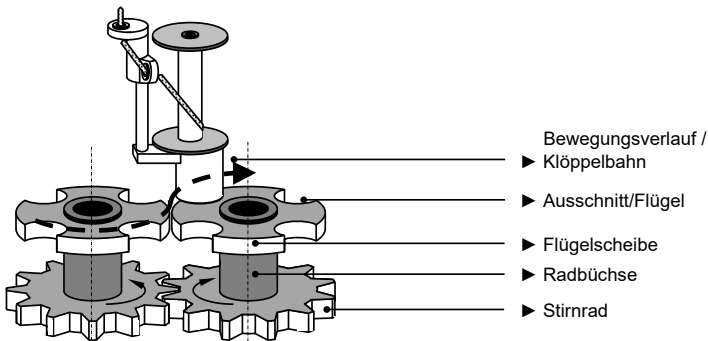


Bild 3.3: Bewegungserzeugung beim Gangbahn-Flügelrad System

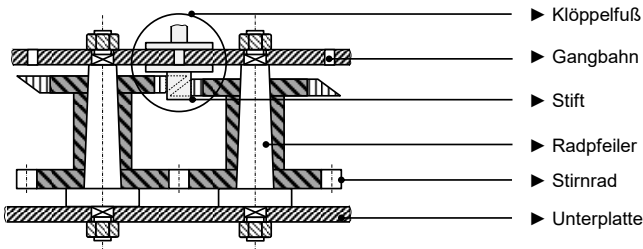


Bild 3.4: Bewegungsübergabe der Klöppelfüße [Lep53, Eng94]

Bei direkt benachbarten Flügelrädern wird das linke Flügelrad als niedriges „Linksrad“, mit mathematisch positivem Drehsinn und das rechte als hohes „Rechtsrad“, mit mathematisch negativem Drehsinn, bezeichnet. Grundsätzlich entspricht der Scheibendurchmesser dem Wälzkreisdurchmesser des zugeordneten Stirnrads mit einer zusätzlichen, gegengleich angephasteten

Kante, um durch die resultierende Überlappung positiv auf die Übergabe des Klöppelfußes Einfluss zu nehmen. Bei dieser konstruktiven Umsetzung des Antriebskonzepts handelt es sich um geführte Klöppel („Barmer Klöppel“ oder „Demuth'scher Patentklöppel“), die mit Hilfe der formschlüssigen Aufnahme der Klöppelstifte von den Flügelrädern durch die Gangbahn geführt werden. Das Flechtbett ist über den Flügelrädern angeordnet und der im Klöppelfuß integrierte Gleitschuh ist konstruktiv derart ausgeführt, dass die Lageorientierung des Klöppels während der Flechtbewegung über die Nutkurve gesichert wird. Die Nutkurve liegt demzufolge stellenweise offen, was in Verbindung mit dem notwendigen Einsatz von Schmiermitteln zu entsprechender Verschmutzung führt.

Im Gegensatz dazu werden die heute primär eingesetzten Klöppel nicht mehr über die Nutkurve gestützt, sondern von den Flügeln getragen. Der Gleitschuh erfüllt im Zusammenspiel mit der Nutkurve die verbleibende Aufgabe der Bewegungsvorgabe zur Erfüllung der Verlegebewegung. Dadurch kann die Flügelscheibe oberhalb des Flechtbetts angeordnet werden und verdeckt die offene Nutkurve zu großen Teilen. Weiterhin wird die Funktion des Ausrichtens, durch die form- und kraftschlüssige Aufnahme, komplett von den Flügelscheiben gewährleistet. Diese konstruktive Ausführung führt zur Reduktion dynamischer Effekte, die sich auf den Klöppel und somit die Fadenverlegung niederschlagen. Der Transport der Klöppel geht derart von statten, dass der Klöppel über seinen Stift (s. Bild 3.4) vom treibenden Rad (links) bis zur Übergabestelle der Gangbahn, und somit zum Berührungspunkt mit dem zweiten Rad (rechts), geführt wird. Die Drehbewegungen der beiden Räder sind derart aufeinander abgestimmt, dass sich die Flügel in der Übergabestelle gegenüberstehen. Befindet sich nun der Klöppel vom treibenden Rad kommend in der Übergabestelle, wird er vom Flügel des zweiten Rades übernommen. Dieser Prozess wiederholt sich zyklisch, je nach Anordnung der Flügelräder und Ausgestaltung der Gangbahn. Die ortsfest zugeführten Stehfäden führen keine Verlegebewegung aus und werden durch die als Hohlkörper ausgeführten Radpfeiler zugeführt und durch das Verkreuzen der Flechtfäden eingebunden. Um eine Kollision der Stehfäden mit den Klöppeln zu vermeiden, werden Piles montiert, um die Umlenkung durch den Abzug erst oberhalb der Klöppel zu ermöglichen. Auch Stehfäden müssen mit einer definierten und konstanten Fadenspannung abgezogen werden. [Kyo15]

Eine Spezifikation der konventionellen Rundflechtmaschinen kann hinsichtlich ihres Aufbaus getroffen werden. Die Ausrichtung des Flechtbetts in Relation zur Abzugsrichtung ist dabei entscheidend für die Einteilung in sowohl Horizontal- oder Vertikalflechtmaschinen als auch hängende Flechtmaschinen. Hieraus ergeben sich keine grundsätzlichen Unterschiede, lediglich die durch die Schwerkraft hervorgerufenen Kraftkomponenten müssen berücksichtigt werden. Der schematische Aufbau konventioneller Rundflechtmaschinen in horizontaler Anordnung zur Herstellung von Rundgeflechten oder flachen Litzengeflechten ist im **Bild 3.5** zu sehen. Das Verkreuzen der Fäden wird durch die wechselseitige Besetzung der Flügelräder erzielt. Während die halbe Anzahl an Klöppeln in eine Richtung entlang der kreisförmigen Anordnung transportiert wird, kreuzen sie zyklisch an der Übergabestelle zwischen den Flügelrädern die Bahn der Klöppel, die in die entgegengesetzte Richtung transportiert werden. Beim Rundflechten wird eine Klöppelserie (Flechtfadensystem 1) kontinuierlich auf einer in sich geschlossenen Führungsbahn und die andere Klöppelserie (Flechtfadensystem 2) entgegengesetzt der ersten transportiert. Bei der Herstellung von Flachgeflechten gibt es nur eine Klöppelserie, die an den Umkehrstellen zum Richtungswechsel gezwungen wird. [Gri14]

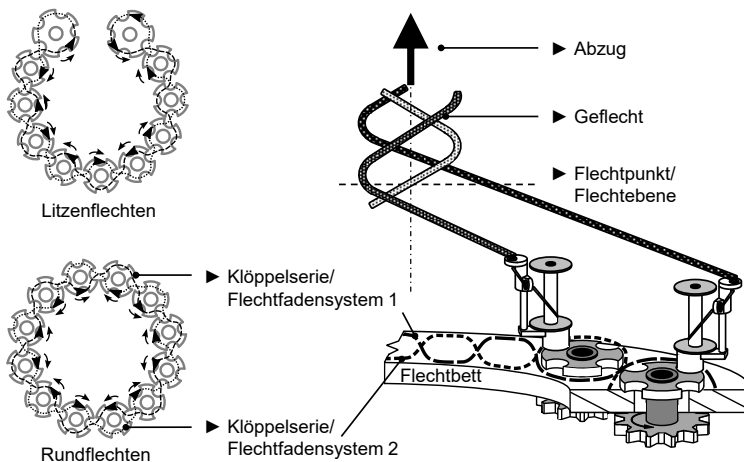


Bild 3.5: Schematischer Aufbau einer Klöppelflechtmaschine [Gri14, Kyo15]



### 3.2.2 Verlegetechnik und Funktionsweise der 3D-Flechtmaschinen

Die Herstellung echter 3D-Geflechte findet auf Zeilen- und Spaltenflechtmaschinen (konventionelle Zeilen- und Spaltenflechtmaschinen sind 4-Schritt-Flechtmaschinen und 2-Schritt-Flechtmaschinen) oder 3D-Rotationsflechtmaschinen statt. Es handelt sich dabei um Weiterentwicklungen der konventionellen Rundflechtmaschinen, basierend auf dem Gangbahn-Flügelrad System. In der Regel kommen beim 3D-Flechten Stehfäden zum Einsatz, die ortsfest und parallel zur Warenkante verlaufen. Auf dem Flechtbett der Zeilen- und Spaltenflechtmaschinen bewegen sich die Klöppel auf untereinander verkreuzten Bahnen. Die 3D-Rotationsflechtmaschinen behalten das Prinzip der Flügelräder bei und sind durch ein spezielles Antriebskonzept in der Lage 3D-Verstärkungsstrukturen herzustellen. [Lao11, Kin12]

#### 4-Schritt-Flechtmaschine

4-Schritt-Flechtmaschinen oder auch 4-Step-Braiding-Maschinen sind zur Herstellung von profilmförmigen 3D-Geflechten mit oder ohne Stehfäden geeignet. Das 4-Schritt-Flechten ist ein diskontinuierlicher Prozess, da die Klöppel pro Schritt zu einem benachbarten Kreuzungspunkt transportiert und dann gestoppt werden. Sie sind auf Klöppelbahnen angeordnet, die durch pneumatische Zylinder verschoben werden. Die Anzahl und Anordnung der Spulen auf dem Flechtbett bestimmt die Form des Geflechts. Die Klöppelbahnen sind jedoch stets gleich angeordnet. Sie kreuzen sich rechtwinklig und werden stets nur um einen Schritt in x- (Zeilen) oder z- (Spalten) Richtung verschoben. Bei jedem Schritt werden entweder alle Klöppel einer Zeile oder einer Spalte gleichzeitig bewegt. **Bild 3.6** zeigt eine beispielhafte Schrittfolge der diskontinuierlichen Stop-and-go-Bewegung der Klöppel. Im ersten Schritt werden alle Spalten gegengleich verschoben. Dabei wird jede erste Spalte nach unten und jede zweite Spalte nach oben bewegt. Mit dem zweiten Schritt erfolgt das Verschieben der Zeilen nach dem gleichen Prinzip. Schritt drei und vier ähneln den ersten beiden Schritten. Sie erfolgen lediglich in entgegengesetzter Richtung. Nach diesen vier Schritten ist die Ausgangsposition der Klöppel wieder erreicht. Das Geflecht entsteht durch kontinuierliche Wiederholung dieser vier Schritte. Im Ausgangszustand wird der Querschnitt des 3D-Geflechts durch die Anzahl und die Anordnung der Klöppel definiert. Durch das festgelegte

Antriebsprinzip sind keine individuellen Klöppelbewegungen und damit auch keine Querschnittsänderungen möglich. Das Flechtbett kann kartesisch oder kreisförmig ausgeführt sein, wobei die Zeilen der kreisförmigen Ausführung konzentrisch und die Spalten radial, senkrecht zu den Kreisen, verlaufen. [Scr13, Gri14]

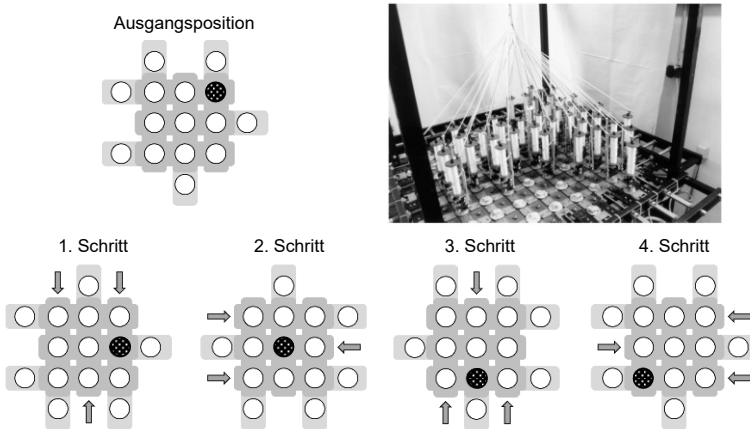


Bild 3.6: Klöppelbewegung beim 4-Schritt-Flechten [Gri14]

## 2-Schritt-Flechtmaschine

In 2-Schritt-Flechtmaschinen oder auch 2-Step-Braiding-Maschinen sind Stehfäden zum Aufspannen des Querschnitts zwingend erforderlich. Die Flechtfäden werden zwischen den ortsfesten Stehfäden geführt und binden diese beim Verkreuzen ein. Die Stehfäden sind in der gewünschten Querschnittsform des Flechtprodukts angeordnet. Wie im **Bild 3.7** schematisiert, fährt zunächst die erste Hälfte der Klöppel diagonal über das gesamte Flechtbett, danach folgt die zweite Hälfte der Klöppel rechtwinklig dazu in entgegengesetzter Richtung. Nach B. Wulffhorst [Gri14] sind 4-Schritt-Flechtmaschinen wie auch 2-Schritt-Flechtmaschinen, aufgrund ihres gemeinsamen Flechtprinzips, zur wirtschaftlichen Fertigung textiler Halbzeuge oder Preforms ungeeignet. Unter anderem sind auf derartigen Maschinen variable Querschnitte nur durch eine Veränderung der Klöppelanordnung auf dem Flechtbett realisierbar. Bei der erforderlichen Verdichtung des Geflechts durch das Anschlagen

von Kämmen muss der Fertigungsprozess angehalten werden. Eine diskontinuierliche Fertigung und darüber hinaus eine Schädigung der Fasern sind die Folge. Einen weiteren Nachteil stellen die eingeschränkten Möglichkeiten den Flechtwinkel zu variieren dar.

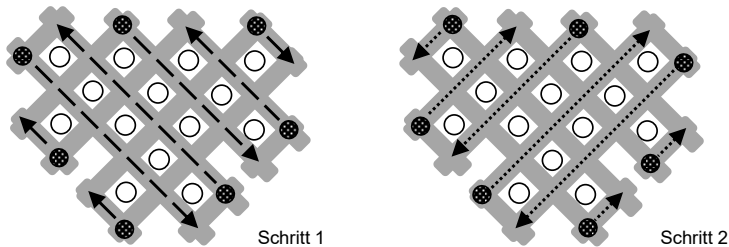


Bild 3.7: Klöppelbewegung beim 2-Schritt-Flechten

Rotatorische 3D-Flechtmaschinen sind wiederum in zwei Maschinengattungen unterteilt. Die maschinentechnische Weiterentwicklung der Packungsflechter zur Realisierung von 3D-Geflechten über drei freie Parameter mit einer variablen und kontinuierlichen Verlegebewegung ist auf das Gangbahn-Flügelrad System angewiesen. Um die Verstärkungsstruktur und Geometrie in geflochtenen textilen Halbzeugen variabel zu gestalten, sind zudem Flechtmaschinen ohne Führungsbahnen entstanden. Der Transport der Klöppel erfolgt formschlüssig zwischen zwei benachbarten Flügelrädern. Um Kollision zu vermeiden, muss in derartigen Flechtmaschinen die Verlegebewegung schrittweise von statten gehen.

### **Packungsflechtmaschine/ Packungsflechter**

Packungsflechter sind eine Sonderform der konventionellen Rundflechtmaschinen. Ihre Funktionsweise basiert auf dem Gangbahn-Flügelrad System der konventionellen Klöppelflechtmaschinen. Die Flügelräder sind jedoch nicht hintereinander, sondern nach der Querschnittsform des zu flechtenden Produkts angeordnet (s. **Bild 3.8**). Sie drehen sich auch hier gegensinnig. Die Klöppel bewegen sich jedoch nicht mehr sinusförmig um die Flügelräder, sondern auf mehreren, nahezu geradlinigen Gangbahnen, die sich untereinander kreuzen. Es ist nicht zwangsläufig gegeben, dass alle Gangbahnen die glei-

che Form aufweisen, jedoch ist stets jeder Gangbahn eine Klöppelserie zugehörig. Die Kreuzung der Gangbahnen bewirkt die mehrfache Verkreuzung der Flechtfäden in Wanddickenrichtung und somit die Entstehung eines 3D-Geflechts. Im Fall der Packungsflechtmaschine haben diese, entsprechend der Anordnung der Flügelräder, hauptsächlich quadratische Formen. [Bue93, Ste15c, Aug15c]

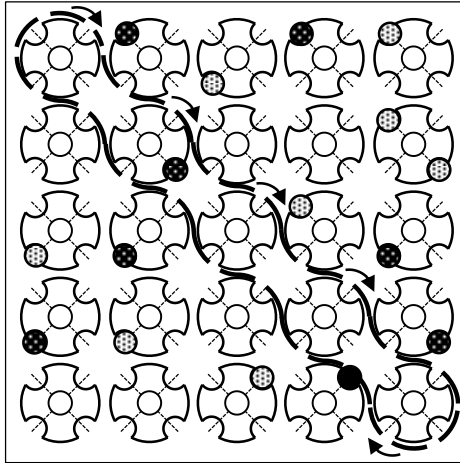


Bild 3.8: schematische Draufsicht auf einen Packungsflechter [Gri14]

### 3D-Rotationsflechtmaschine

In kontinuierlich arbeitenden 3D-Rotationsflechtmaschinen (s. **Bild 3.9**, rechts) werden die Flügelräder schachbrettartig auf dem Flechtbett angeordnet. Der Antrieb der Flügelräder wird um je eine Kupplung und je eine Bremse erweitert (s. **Bild 3.9**, links), um eine definierte Bewegungssteuerung gewährleisten zu können. Die Führungsbahnen sind mit Weichen an den Kreuzungspunkten versehen. Diese Weichen erlauben zwei unterschiedliche Stellungen zur Führung der Klöppel. In der ersten Stellung wird der ankommende Klöppel an das benachbarte Flügelrad im Kreuzungspunkt übergeben. Die zweite Stellung vermeidet eine Übergabe und der Klöppel wird auf seinem bisherigen Flügelrad weiter transportiert. Alle Flechtfäden können somit nahezu beliebig

über das Flechtbett bewegt werden. Die Integration von Stehfäden ist über Zuführhülsen/ Piles in der Flügelradrehachse möglich. Die Fertigung runder Querschnitte ist nicht möglich. [Pot12, Scr13]

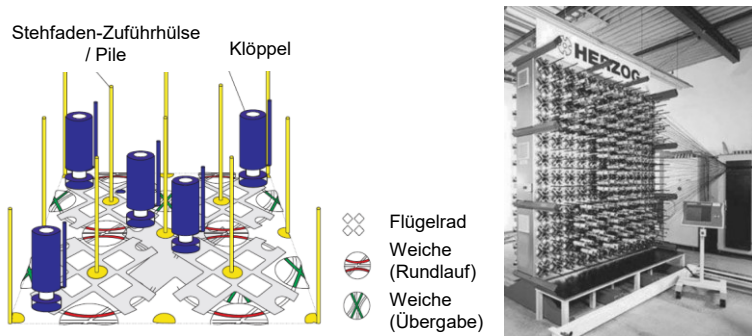


Bild 3.9: Prinzip 3D-Rotationsflechten [Gri14], 3D-Rotationsflechter [Lao11]

Der bisher beschriebene Aufbau begrenzt sich auf eine Anordnung von 4x4 bzw. 5x5 Flügeln, was als ein Modul bezeichnet wird. Es ist möglich das Flechtbett einer 3D-Rotationsflechtmaschine mit mehreren Modulen beliebig zu erweitern. Die Übergabe der Klöppel zwischen den einzelnen Modulen erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie im Modul selbst. Da sich die Anordnung der Flügeln in der Form des Geflechts niederschlägt, ist es möglich L- oder T-Profile herzustellen. Das 3D-Rotationsflechten zeichnet sich des Weiteren durch eine hohe Flexibilität bezüglich des Flechtwinkels aus. Über das Verhältnis der Abzugsgeschwindigkeit in Bezug auf die Flügelradrehzahl kann der Flechtwinkel beliebig beeinflusst werden. Durch individuelle Steuerung ist die Herstellung von komplexen 3D-Geflechten, so auch Geflechte mit veränderlichen Querschnitten, möglich.

F. Schreiber [Scr13] beschreibt die Funktionsweise der schrittweise arbeitenden 3D-Rotationsflechtmaschinen, mit formschlüssig zwischen benachbarten Flügeln positionierten Klöppeln. Demnach werden die Klöppel durch die Drehbewegung der Flügeln bewegt und zur vorgegebenen Übergabestelle transportiert. Nach diesem Prinzip entfällt eine Gangbahn komplett und die kreisförmige Bewegung der Klöppel wird alleine durch die Flügeln re-

alisiert. Dies hat zur Folge, dass eine gleichzeitige Bewegung zweier benachbarter Flügelräder nicht zulässig ist. Aufgrund dieser Restriktion erfolgt der Transport eines Klöppels schrittweise. Die maschinentechnische Umsetzung erlaubt die komplette Besetzung eines Flügels und somit eine höhere Anzahl an Flechtfäden gegenüber kontinuierlichen 3D-Flechtmaschinen gleicher Baugröße. Schrittweise arbeitende 3D-Flechtmaschinen sind Gegenstand vielfältiger Entwicklungsarbeiten, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden kann. Bereits M. Milwich [Mil98] thematisierte die Entwicklung einer 3D-Flechtmaschine mit Direktantrieben zum gesteuerten Antrieb der Klöppel unterhalb des Flechtbetts.

### 3.2.3 Rund- und Radialflechtmaschinen zum Überflechten

Wie unter anderem von Birkefeld [Bir13] beschrieben, werden konventionelle Fertigungsprozesse zur Herstellung von Halbzeugen oder Preforms durch Überflechten auf Basis von speziellen Rundflechtmaschinen mit großer Durchgangsöffnung (s. **Bild 3.10**; vgl. [War15b, Ste15b] oder den eigens zur Verarbeitung von Rovings aus Verstärkungsfasern entwickelten Radialflechtmaschinen (s. **Bild 3.11**) aufgebaut. Die Erzeugung der Verlegebewegung erfolgt nach dem Gangbahn-Flügelrad System, analog der Rundflechtmaschinen (s. Bild 3.5) auf einem ebenen, ringförmigen Flechtbett mit axialer Anordnung der Spulen hinsichtlich der Maschinenhauptachse. Aufgrund entscheidender Nachteile führt die Verarbeitung von Verstärkungsfasern zu signifikanten Faserschädigungen und Produktbeeinträchtigungen (vgl. Kapitel 4.4.2).

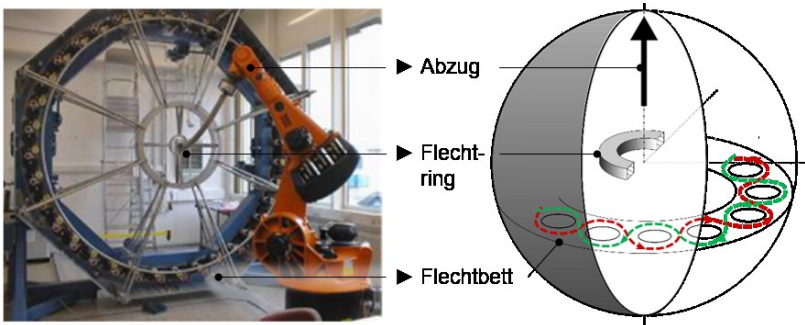


Bild 3.10: Rundflechtmaschine [Bir13] (links); Verlegebewegung (rechts)

Im Gegensatz dazu findet bei der Radialflechtmaschine die Verlegebewegung auf einem annähernd holkugelförmigem Flechtbett (s. Bild 3.11, rechts) mit radialer Anordnung der Spulen hinsichtlich der Maschinenhauptachse statt. Wie schon in der von Gustav Langensiepen aus Barmen am 8. Januar 1878 patentierten „Neuerung an Klöppelmaschinen“ [Lan78], resultiert aus der hohlkugelförmigen Verlegebewegung um den Flechtzentrum die geringstmögliche Fadenlängenänderung und eine schadigungsarme Verlegung. Der bisher größte Radialflechter Typ RF 1/144-100 der Firma **August Herzog Maschinenfabrik** [Aug15b], kann mit bis zu 432 Spulen (Spule: 55 x 170 x 130 mm; Spulvolumen: 265 ccm) bestückt, und bei maximal 150 U/min am Flügelrad angetrieben werden. Somit bietet der Radialflechter eine hohe Faserablage-rate im Vergleich zu anderen Verfahren. Zum Überflechten mit 3D-Flechtstrukturen können am Radialflechter zusätzliche Ringe mit weiteren Flügelrädern angebracht werden. Man bezeichnet diese erweiterten Radialflechter auch als Multilayer Interlockbraider [Lao11, Gri14]. Die Klöppel können sich über vorgesehene Übergänge zwischen den Ringen bewegen. Dies ermöglicht die Verflechtung der einzelnen Geflechschichten untereinander.

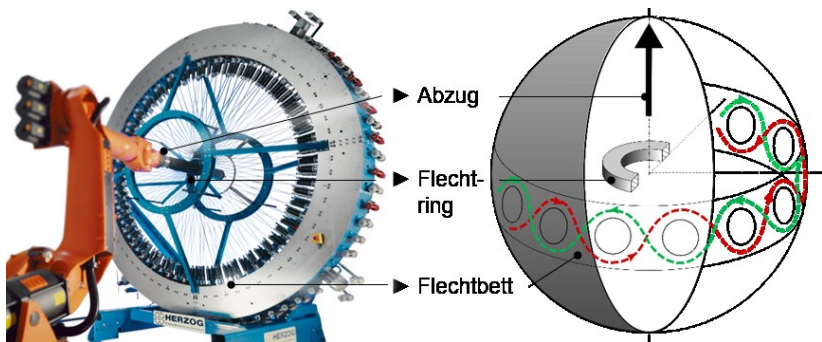


Bild 3.11: Radialflechtmaschine [Bir13] (links); Verlegebewegung (rechts)

Beim Überflechten von formgebenden Flechtkernen mit variablen Kernquerschnitten und Krümmungen ist eine eindimensionale Abzugsbewegung entlang der Maschinenhauptachse nicht zielführend (vgl. [Die91, Cah02]). Der Kern muss zur konturadaptiven Ablage der Verstärkungsfasern im Flechtzentrum mit Hilfe eines Roboters multiaxial ausgerichtet und zum Zusammenziehen des Geflechts auf der Kernoberfläche durch das Flechtbett geführt

werden. Um den Flechkern entlang dieser konturspezifischen Bahnkurven kollisionsfrei führen zu können, sind die Flechtvorrichtungen ringförmig aufgebaut und mit Flechtringen zur Ausformung einer Flechtebene ausgestattet. Die beiden prinzipiell zweidimensionalen Flechtmaschinentypen sind mit dieser Vorgehensweise in der Lage 2 1/2 D- Kohlenstofffaserhalbzeuge [Ind11, Gra12] mit zweidimensionaler und multiaxialer Verstärkungsstruktur herzustellen.

Mit Hilfe eines verstellbaren Flechtrings kann zusätzlich Einfluss auf die Garnausrichtung und die Geometrie des Flechkerns (z.B. Querschnittsänderungen) genommen werden. Je geringer der Abstand zwischen dem Rand des Flechtrings und dem Flechkern, desto präziser ist der Einfluss der Garnausrichtung. Im Falle eines Bauteils mit unterschiedlichen Querschnittsgrößen wäre eine präzise Garnausrichtung nur am größten Querschnitt möglich. [Han12]

### **3.2.4 Klöppel und Fadenabzugsspannung**

Ein qualitativ hochwertiges Flechtprodukt zeichnet sich in erster Linie durch unbeschädigtes Flechtmaterial und durch einen vorgabekonformen Flechtwinkel, in Form eines meist geschlossenen und homogenen Warenbilds über das komplette Produkt hinweg, aus. Der Flechtwinkel ist durch eine Querschnittsänderung des Flechkerns oder durch eine Änderung der Abzugsgeschwindigkeit beeinflussbar. Die Abzugsgeschwindigkeit hängt direkt mit der Fadenabzugsspannung oder auch Fadenlängskraft zusammen [Kun04, Nic14, Bec14]. Eine zu hohe Fadenabzugsspannung birgt die Gefahr einer direkten Schädigung des Flechtmaterials bis hin zum kompletten Riss, wohingegen eine zu niedrige Fadenabzugsspannung zur Beeinträchtigungen des Flechtprodukts oder zur indirekten Schädigung des Flechtmaterials durch Kollision führt (s. a. die im Kapitel 3.2.5 folgenden Ausführungen zum Abzug und Flechtwinkel).

Neben dem Spulentransport und der Sicherung der Lage der Spulen besteht die Hauptaufgabe der Klöppel darin, eine konstante Fadenabzugsspannung während des kompletten Flechtprozesses, bei gleichzeitig schädigungsarmer Handhabung der Flechtmaterialien, zu gewährleisten. Diese anspruchsvolle



Aufgabenstellung macht den Klöppel zu einer Kernkomponente der Flechtmaschine und gestaltet sich vor allem im Hinblick auf das breite Spektrum an unterschiedlichen Flechtmaterialien (s. a. Bild 2.11 und Bild 2.12) als komplexe Herausforderung. Klöppel sind daher meist nur für eine definierte Gruppe an Flechtmaterialien ausgelegt, um die zulässige, maximale Fadenzugfestigkeit (s. Tabelle 2.1) und weitere Materialcharakteristika, wie kritische Biegeradien und das tribologische Verhalten, berücksichtigen zu können. Der Klöppel selbst ist in der Regel auf eine Fadenabzugsspannung von ca. zehn Prozent der maximal zulässigen Fadenzugfestigkeit des eingesetzten Flechtmaterials ausgelegt bzw. eingestellt. Weitere Anforderungen an den Klöppel sind die definierte und prozessbedingte Freigabe von Flechtmaterial und die Maschinenstillsetzung im Fall eines Fadenbruchs. Um eine große Menge an Flechtmaterial zu transportieren, sind Klöppel möglichst kompakt und dennoch stabil ausgeführt. Hinsichtlich der Bestückung und der Produktivität ist zudem ein schneller und unkomplizierter Spulenwechsel anzustreben. [Eng94]

Die genannte Fadenabzugsspannung in Verbindung mit der zu transportierenden Masse an Flechtmaterial, bei einer meist vorgegebenen Produktionsgeschwindigkeit, sind die wesentlichen Prozesskräfte, die zur Dimensionierung der Spulenaufnahme und des Klöppelfußes herangezogen werden. Die Hauptaufgabe des Klöppelfußes ist mit der Aufnahme des technologiebedingten Bewegungsverlaufs bereits eingehend erläutert (s. Bild 3.3 und Bild 3.4). Aus dem wechselförmigen Bewegungsverlauf resultiert ein inkonstanter Abstand vom Fadenabzugspunkt bis zum Flechtpunkt, der wiederum die Ursache für eine schwankende Fadenlänge und die einhergehenden Schwankungen der Fadenabzugsspannung darstellt. Der Fadenabzugspunkt entspricht dem Fadenführungselement mit dem geringsten Abstand zum Flechtpunkt. Im **Bild 3.12** wird die Abhängigkeit der Fadenlängenänderung zur Verlegebewegung am Beispiel eines kartesischen Flechtbetts aufgezeigt. Die mathematische Beschreibung der Fadenlängenänderung  $\Delta L$  erfolgt dabei rein geometrisch und ohne Berücksichtigung von Materialelastizitäten sowie Fadenschwingungen. [Bue93, Kyo15]

$$\Delta L = \sqrt{h^2 + s^2} - h \quad (3.1)$$

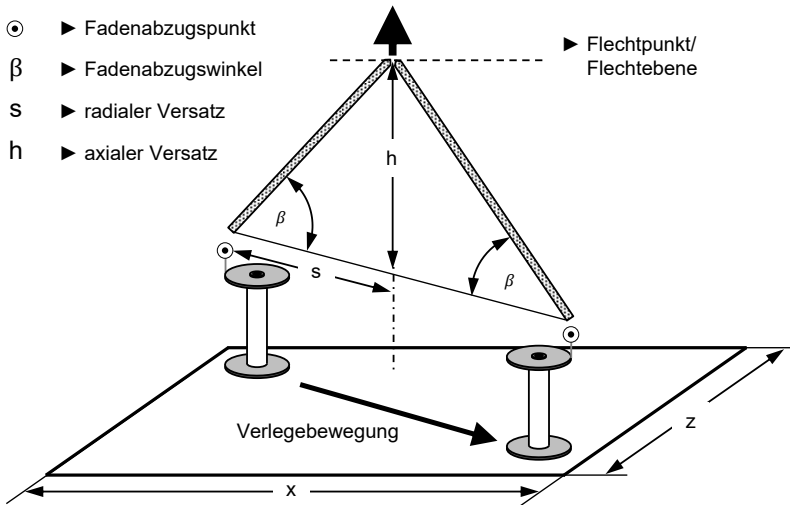


Bild 3.12: Abhängigkeit der Längenänderung zur Verlegebewegung [Bue93]

Um eine annähernd konstante Fadenabzugsspannung zu erhalten, werden unterschiedliche Kompensationseinrichtungen eingesetzt. Beispielsweise verfügen die von B. Lepperhoff [Lep53] beschriebenen Klöppel über ein System aus einem Gegengewicht und einem Schieber. Dieses Prinzip kommt heute jedoch nur noch selten zum Einsatz. Klöppel nach dem Stand der Technik erzielen ihre Kompensationswirkung in der Regel durch eine mechanisch-passive Tänzerregelung mit vorgespannten Federn, in Verbindung mit einem Ausgleichsmechanismus. Das Prinzip wird im **Bild 3.13** beispielhaft an einem typischen Klöppel mit Ausgleichshebel gezeigt. Das Flechtmaterial wird durch das System aus Fadenführungselementen von der Spule abgezogen. Der Fadenabzugspunkt stellt den höchsten Punkt der Klöppelgeometrie dar, um einen zerstörungs- und kollisionsfreien Abzug zu ermöglichen.

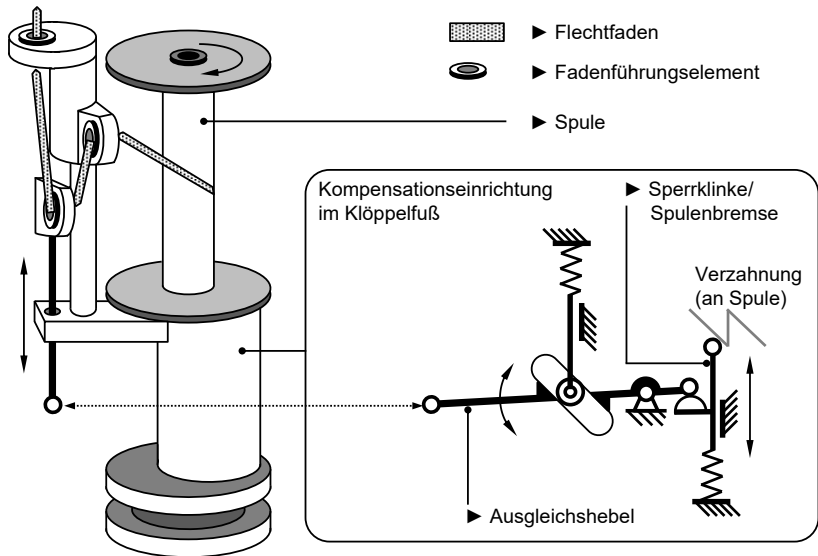


Bild 3.13: Hebelklöppel einer konventionellen Rundflechtmaschine [Bue93]

Die Fadenabzugsspannung wird bei dem gezeigten Hebelklöppel über eine Positionsänderung des mittleren Fadenführungselements und der resultierenden Längenänderung der im Kompensationskreislauf gespeicherten Fadenspannung reguliert. Bei erhöhter Fadenspannung wird das mittlere Fadenführungselement gegen die am Ausgleichshebel angreifende Federkraft nach oben gezogen. Lässt die Fadenspannung nach, sinkt das Fadenführungselement aufgrund des Rückzugverhaltens der vorgespannten Feder und hält somit die Fadenspannung konstant. Aufgrund dieser Ausgleichsbewegung erfahren die Flechtfäden eine reibungsbehaftete Relativbewegung gegenüber den Fadenführungselementen. Bei Fadenbedarf steigt die Fadenspannung über den von der Federkraft abhängigen Grenzwert und der Ausgleichshebel drückt die Sperrklinke über einen Bolzen aus der Sägeblattverzahnung unterhalb der Spule. Daraufhin kann sich die Spule drehen und die benötigte Fadenmenge freigeben, bis die Fadenspannung nachlässt und die Sperrklinke durch die Federkraft in die Ausgangsstellung zurückkehrt und somit die Drehung der Spule blockiert. Die materialabhängige Fadenabzugsspannung wird

über die Federvorspannung des Ausgleichshebels eingestellt. Die Sperrklinke, in Verbindung mit der entsprechenden Gegenform an der Spule, stellt die sogenannte Spulenbremse in Form eines Richtgesperres dar. Weitere bekannte Klöppelvarianten werden von Büsgen [Bue93], E. Laourine [Lao11] oder B. Lepperhoff [Lep53] beschrieben. Für eine ausführliche kinematische und kinetostatische Analyse der Wirkzusammenhänge im Klöppel sei an dieser Stelle auf Kyosev, „Braiding Technology for Textiles“ [Kyo15], verwiesen.

Nach Büsgen [Bue93], Birkefeld [Bir13] und J. Kuntz [Kun04] ist die Ursache von Faserschädigungen vornehmlich an den Reibstellen zwischen den Flechtfäden und den Fadenführungselementen am Klöppel, sowie der durch die Federkräfte und den Abzug hervorgerufenen Fadenspannung zu suchen. Vor allem bei der Verarbeitung von bandförmigen Rovings liegt die Ursache der Faserschädigungen oder der Filamentbrüche in der Relativbewegung, resultierend aus dem variablen Fadenverbrauch. Entscheidende Faktoren dabei sind die Einschnürung und Kompression, die Umlenkradien und Umlenkrichtungen der Flechtfäden, sowie die tribologischen Effekten im Zusammenspiel des Flechtmaterials und den Fadenführungselementen. Durch den Aufbau des Klöppels (s. **Bild 3.14**) und die Wahl der Fadenführungselemente sind die genannten Faktoren, wie die auftretenden Umlenkradien bzw. Einschnürungen, die Materialpaarung an den Reibstellen und die Fadenvorspannkraft aufeinander abzustimmen. Je weniger Umlenkstellen, desto weniger Reibstellen, desto geringer die Möglichkeit einer Faserschädigung durch die Umlenkung an den Fadenführungselementen. Um Faserschädigungen während der Verarbeitung zu vermeiden, bietet sich eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Optimierung konventioneller Klöppel. Beispielsweise können die Reibungskoeffizienten der Fadenführungselemente durch spezielle Beschichtungen oder die gezielte Beeinflussung von deren Oberflächenstruktur auf das Flechtmaterial abgestimmt werden. Die Analyse tribologischer Effekte und die Optimierung der Fadenführungsparameter sind Gegenstand vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden kann [Mue12, Bec14, DFG15c]. Durch den Einsatz von Keramik erhöht sich zudem die Lebensdauer der stark abrasiv beanspruchten Führungselemente. Für viele metallische Flechtmaterialien mit hoher Biegesteifigkeit und Festigkeit werden häufig wälzgelagerte Fadenführungselemente eingesetzt, um einer Beschädigung des Fadenführungselements durch Verschleiß entgegenzuwirken.

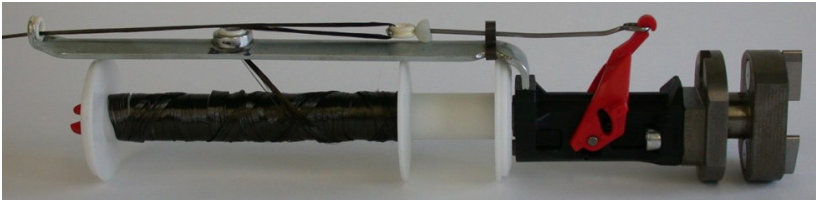


Bild 3.14: Konventioneller Hebelklöppel mit Kohlenstofffaser Roving [Kun04]

Um die Schädigung der Flechtfäden weiter zu senken, werden zusätzliche Maßnahmen an den Klöppeln ergriffen. Beispielsweise kommen Leitbleche (s. **Bild 3.15**) zum Einsatz, die das direkte Abzugsverhalten von der Spule zum ersten Fadenführungselement verbessern. Die Grundvoraussetzungen zum sauberen Abzug von einer Spule liegen vor allem in der Abzugsrichtung, tangential zur Spulennachse in der Bandebene [Kyo15]. Die folgende nötige Umlenkung, senkrecht gegen die Bandebene des Rovings, kann nach Kuntz [Kun04] zum Aufbrechen der Bandanordnung führen. Alle anschließenden Umlenkungen erfolgen mit der Bandebene und rufen lediglich eine Richtungsänderung hervor. Weitere Entwicklungen beschäftigen sich mit der definierten und gesteuerten Freigabe von Flechtmaterial durch elektronisch geregelte Kompensationseinrichtungen. Mit der sensorischen Erfassung der im Prozess vorherrschenden Fadenspannung und der Signalverarbeitung in einem Regelkreis, kann beispielsweise Servoantriebstechnik zur definierten Fadenfreigabe eingesetzt werden. Dadurch erfolgt nahezu keine Relativbewegung an den Fadenführungselementen aufgrund der variablen Fadenlänge und der schwankenden Fadenabzugsspannung. Vor allem die Integration der notwendigen Antriebstechnik und Sensorik in die Klöppel und deren Energieversorgung erweist sich als aufwendig und kostenintensiv [Bir13, COE15].

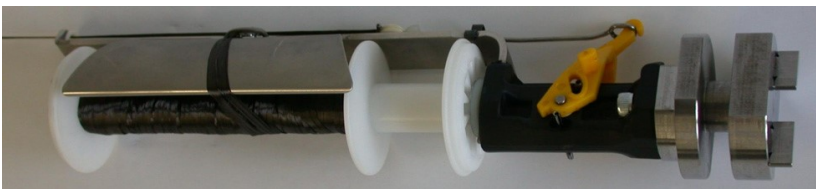


Bild 3.15: Klöppel mit Fadenleitblech und Kohlenstofffaser Roving [Kun04]

Die schädigungsarme Handhabung des Flechtmaterials beginnt nicht beim Klöppel selbst. Vor allem das Auf- und Abspulen der Spule trägt einen entscheidenden Anteil an einem sauberen und gleichmäßigen Abzugsverhalten des Flechtmaterials. Beim Auf- bzw. Umspulen wird die Ausrichtung der Flechtmaterialien in unterschiedlichen Spultechniken schichtweise und in definierter Spannung auf die Spule gewickelt. Die Spannung, mit der die Wicklungen auf die Spule gebracht werden, ist größer oder gleich der Fadenabzugsspannung beim Flechtprozess. Zudem werden alle Klöppel mit identischer Fadenspannung, Fadenausrichtung und Fadenmenge bestückt. Das Abziehen von der Spule kann tangential oder axial erfolgen, wobei das axiale Abziehen zur Beeinträchtigung der Wicklungen führen kann [Bue93]. Für eine ausführliche Aufbereitung des Spulprozesses sei an dieser Stelle wiederum auf Kyosev, „Braiding Technology for Textiles“, Kapitel 10 [Kyo15], verwiesen.

### 3.2.5 Abzug und Flechtring

Die Hauptaufgabe der Abzugseinrichtung besteht aus dem Abziehen des im Flechtpunkt entstandenen Geflechts. In Abhängigkeit von der Struktur, dem geometrischen Aufbau und dem Flechtverfahren sind unterschiedliche Abzugsvarianten hinsichtlich der technologisch erforderlichen Abzugsbewegung und dem damit verbundenen mechanischen Aufbau im Einsatz. Nach Kyosev [Kyo15] spricht man bei der kontinuierlichen Herstellung von einfachen Rundgeflechten (vgl. Bild 2.26) mit konstantem Querschnitt von einer linearen und eindimensionalen Abzugsbewegung. Diese Abzugsbewegung wird in der Regel von einem System aus mindestens einer angetriebenen Abzugsscheibe und mindestens einer unterstützenden Umlenkscheibe realisiert. Die Abzugswirkung und somit das Aufbringen der benötigten Abzugskraft basiert auf dem Prinzip der Seilreibung, die beim Umschlingen der Abzugsscheibe vom Geflecht entsteht.

Wie im **Bild 3.16** dargestellt, wird das Geflecht aufgrund der wirkenden Seilkräfte an die Abzugsscheibe gepresst. Durch den Effekt der Seilreibung ist die Abzugskraft bzw. Lastkraft  $F_{\text{Last}}$  deutlich höher als die Leerkraft  $F_{\text{Leer}}$ . Mit dem Umschlingungswinkel  $\gamma$  des Seils an einer zylindrischen Abzugsscheibe und dem Reibungskoeffizient  $\mu$  wird dieses Verhältnis nach der Gleichung von Euler-Eytelwein beschrieben. [Bee86, Vol88]

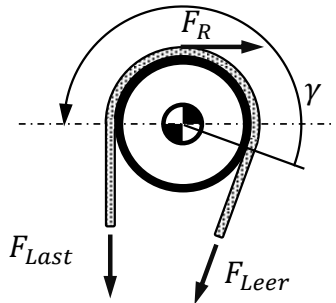


Bild 3.16: Reibung an der Abzugsscheibe

$$\frac{F_{Last}}{F_{Leer}} = e^{\mu\gamma} \quad (3.2)$$

Die Reibkraft  $F_R$  ergibt sich wie folgt:

$$F_R = F_{Leer} * (e^{\mu\gamma} - 1) \quad (3.3)$$

Die minimal aufzubringende Abzugskraft geht sich bei einem einfachen Rundgeflecht ohne Kern aus der Gesamtanzahl der Klöppel und der an ihnen eingestellten Fadenabzugskraft hervor. Zur Steigerung der Reibkraft und somit der Abzugskraft werden die Abzugsscheiben zum einen mit rauen Oberflächen beschichtet, die einen hohen Reibungskoeffizient aufweisen; zum anderen werden die Abzugsscheiben meist vier bis fünfmal umschlungen, um den Reibungseffekt zu potenzieren und ein Rutschen oder einen Kontaktverlust zwischen dem Geflecht und der Abzugsscheibe, aufgrund von Maschinenschwingungen, zu vermeiden. Zur Lagesicherung der Seilschlingen auf der Abzugsscheibe wird die Umlenkscheibe mit Führungsritzen ausgestattet. Vor allem für schwere Geflechte, die prozesssichere und hohe Abzugskräfte erfordern, kommen Abzugssysteme zum Einsatz, bei denen die Reibkraft durch das zusätzliche Anpressen des Geflechts an die angetriebene Abzugsscheibe erhöht wird. Eine derartige Abzugseinrichtung führt zwangsläufig zu Deformationen und Faserschädigungen am Flechtprodukt. [Kyo15]

Für biegeempfindliche Materialien oder mehrschichtig aufgebaute Rundgeflechte (vgl. Bild 2.26) werden in der Regel sogenannte Raupenabzüge eingesetzt. Die Abzugswirkung der Raupenabzüge entsteht durch das definierte Andrücken des Geflechts an zwei symmetrisch entlang der Abzugsrichtung angeordneten Abzugsbändern. Diese Abzugsbänder sind, ähnlich einem Riemtrieb, über je zwei Rollen gespannt und verfügen über einen synchronisierten Antrieb. Der Druck vom Geflecht auf die Bänder wird über den Abstand der beiden Bänder zueinander eingestellt und ruft wiederum eine Reibkraft zwischen dem Geflecht und den Abzugsbändern hervor. Eine Biegung des Flechtprodukts wird durch die quasi linienförmige Anordnung und die einhergehende linienförmige Reibkraftverteilung vermieden. Deformationen des Flechtprodukts können aber auch hier nicht gänzlich vermieden werden. Zur Herstellung eines schichtweise aufgebauten Geflechts muss der Flechkern mehrfach überflochten und somit mehrfach durch den Flechtpunkt gezogen werden. Um ein mehrschichtiges Rundgeflecht auf einer Flechtvorrichtung prozesssicher herstellen zu können, ist eine eindimensionale aber bidirektionale Abzugsbewegung notwendig. Diese Führungs-/Bewegungsaufgabe kann mit Hilfe zweier synchronisierter Raupenabzüge, vor und hinter dem Flechtbett, realisiert werden. Raupenabzüge können, je nach Aufbau, in beide Richtungen steuerbar betrieben werden. Unter Einsatz einer kraft-weggesteuerten Abstandsregulierung können auch Geflechte mit variablem Querschnitt prozesssicher abgezogen werden. [Kyo15]

Zur Herstellung mehrschichtig aufgebauter Geflechte mit variablem Querschnitt durch bidirektionale Abzugsbewegung, oder zur Herstellung endkonturnaher Preforms mit multiaxialer Abzugsbewegung, müssen Flechtringe (s. **Bild 3.17**) eingesetzt werden. Die Flechtringe sind coaxial zur Maschinenhauptachse angeordnet und zueinander leicht versetzt. Das Geflecht zieht sich nicht mehr in einem Punkt, sondern auf einer Flechtebene zusammen, deren Form maßgeblich vom Querschnitt des Flechkerns abhängt. Die Flechtebene bildet sich zwischen den beiden Flechtringen aus, deren Größe sich ebenfalls nach dem Querschnitt des Flechkerns richtet. Bei dieser Anordnung werden die Flechtfäden von den Klöppeln über den Fadenabzugspunkt abgezogen, zwischen den beiden Flechtringen hindurchgeführt und im Flechtprodukt eingebunden und abgezogen. Die Flechtfäden werden an den Flechtringen umgelenkt und ziehen sich auf der



Flechzebene zusammen. Das Umlenken der Flechtfäden an den Flechtringen fixiert den Flechtprozess auf der durch die Flechtringe vorgegebenen Ebene. Vor allem bei der prozessbedingten, bidirektionalen oder multiaxialen Abzugsbewegung, kann die Abzugsgeschwindigkeit gegenüber der Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung stark schwanken, um eine Querschnittsänderung mit gleichbleibendem Flechtwinkel und somit gleichbleibender Orientierung der Verstärkungsfasern konturadaptiv überflechten zu können. Wenn die Abzugsgeschwindigkeit gegenüber der Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung sehr klein wird, verkleinert sich der Abstand des Flechtpunkts zum Flechtbett. Ab einer von der Maschinenkonfiguration abhängigen, minimalen Abzugsgeschwindigkeit kollidieren die Flechtfäden mit den Klöppeln, was zwangsläufig zum Kollabieren des Flechtprozesses führt. Das Durchhängen von Flechtfäden sollte gänzlich vermieden werden. [Roe91, Kyo15]

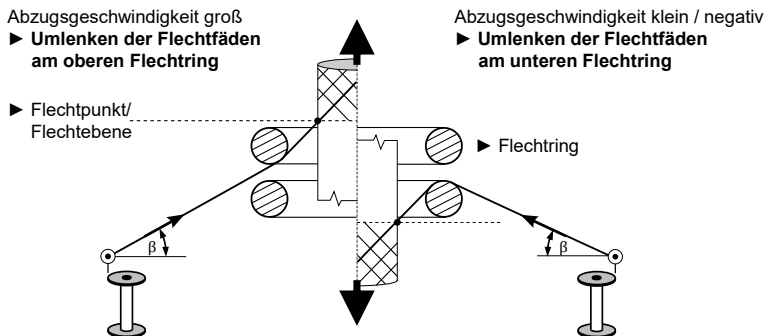


Bild 3.17: Flechtring

### 3.2.6 Flechtprozess und Prozessbeschreibung

Der Flechtprozess, bezogen auf das Verkreuzen und Zusammenziehen der Flechtfäden, findet beim konventionellen Rundflechten im natürlichen Flechtpunkt statt. Die Flechtfäden verkreuzen sich bei konstanter Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung und konstanter Abzugsgeschwindigkeit ohne Abstandsänderung des Flechtpunkts zum Flechtbett (s. Bild 3.12). Mit einer Ver-

änderung der Abzugsgeschwindigkeit vergrößert oder verkleinert sich der Abstand des Flechtpunkts und der Flechtwinkel  $\alpha$  verkleinert oder vergrößert sich. Im idealen Flechtprozess ähnelt die isolierte Betrachtung eines Fadensystems dem lageparallelen Umwickeln des Kerns, ohne reibungsbehaftete Gleiteffekte sowie Fadenumlenkungen. Aufgrund der damit vereinfachten und rein geometrischen Zusammenhänge ist der Flechtwinkel  $\alpha$  gleich dem Fadeneinlaufwinkel  $\alpha'$ . Durch das Erhöhen der Abzugsgeschwindigkeit wird der Flechtwinkel  $\alpha$  und der Fadeneinlaufwinkel  $\alpha'$  automatisch kleiner.

Im realen Flechtprozess treten reibungsbehaftete Gleiteffekte an den Kontaktstellen der Flechtfäden untereinander, am Flechtkern und an allen anderen Fadenführungselementen auf. In diesem Zusammenhang müssen auch die Verformungseigenschaften der Flechtfäden berücksichtigt werden. Überschreitet der Durchmesser bzw. die Flechtfadenbreite  $b_{FF}$  eines Flechtfadens den Abstand zweier benachbarter Flechtfadenpfade, kommt es zu reibungsbehafteten, lateralen Kontaktstellen der Flechtfäden untereinander, die einer Ablage entlang des eingestellten Flechtwinkels entgegenwirken; der Flechtwinkel  $\alpha$  entspricht nun nicht mehr dem Fadeneinlaufwinkel  $\alpha'$ . Bei einem konstanten, von der Maschinenkonfiguration abhängigen, Verhältnis der Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung - oder auch Flechtgeschwindigkeit - zur Abzugsgeschwindigkeit (s. **Bild 3.18**), entsteht ein Geflecht mit konstantem Flechtwinkel, quasi ohne Beeinflussung der Flechtfadenablage durch reibungsbehaftete, laterale Kontaktstellen der Flechtfäden untereinander.

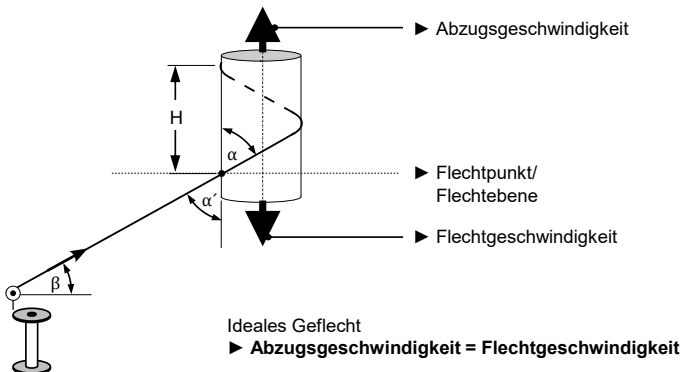


Bild 3.18: Flechtwinkel, Fadeneinlaufwinkel und Fadenabzugswinkel

Die Abzugsgeschwindigkeit entspricht demnach der Geschwindigkeit, in der das Geflecht im Flechtpunkt (Flechtgeschwindigkeit) entsteht. Dieses sogenannte ideale Geflecht kann, unter der Voraussetzung eines zylindrischen Flechtprodukts, zentral zur Maschinenhauptachse und bei einer Flechtdichte von FD gleich eins, für das nach (2.3) zu ermittelnde Verhältnis aus Abzugs- und Flechtgeschwindigkeit, sowie der bekannten Flechtfadenbreite erzeugt werden. Sehr biegesteife Materialien (s. mechanischen Kenngrößen des Flechtmaterials Tabelle 2.1) führen schon bei einem Abstand zweier benachbarter Flechtfäden größer als deren Flechtfadenbreite zu Deformationen, die in der Kalkulation meist mit Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. [Raw05, Kyo15]

Wird gegenüber dem idealen Geflecht bei konstanter Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung die Abzugsgeschwindigkeit erhöht, vergrößert sich der Abstand des Flechtpunkts zum Flechtbett. Mit wachsendem Abstand des Flechtpunkts verkleinert sich der Flechtwinkel proportional. Theoretisch kann durch die Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit der Flechtwinkel auf annähernd  $0^\circ$  gebracht werden. Ein Flechtwinkel von  $0^\circ$  ist jedoch praktisch, aufgrund der Anordnung des Abzugsmechanismus, nicht umsetzbar. Nach Kyosev [Kyo15] handelt es sich bei dem entstehenden Geflecht um ein offenes Geflecht mit niedriger Flechtdichte. Je kleiner der Flechtwinkel, desto offener ist das Geflecht. Ein offenes Geflecht weist beim Überflechten meist leicht erkennbare Lücken und große Abstände zwischen den Bindungen auf. Das Flechtprodukt ist in der Regel biegeschlaff und wenig formstabil.

Wird gegenüber dem idealen Geflecht bei konstanter Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung die Abzugsgeschwindigkeit verringert, verkleinert sich automatisch der Abstand des Flechtpunkts zum Flechtbett und der Flechtwinkel wächst. Mit sinkendem Abstand des Flechtpunkts vergrößert sich der Flechtwinkel proportional. Nach Kyosev [Kyo15] handelt es sich bei dem entstehenden Geflecht um ein geschlossenes Geflecht mit hoher Flechtdichte. Die untere Grenze der Abzugsgeschwindigkeit bei konstanter Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung, was somit das Geflecht mit höchst möglicher Dichte darstellt, ist seinerseits von der Maschinenkonfiguration und dem Flechtmaterial abhängig. Je dichter ein Geflecht im Flechtprozess hergestellt wird, desto weniger biegeschlaff ist das Flechtprodukt. Theoretisch können Flechtwinkel bis annähernd  $90^\circ$  realisiert werden, ohne eine Kollision mit den Klöppeln hervorzurufen. Der Flechtpunkt

darf nicht unter die Höhe des Fadenabzugspunkts der Klöppel gesenkt werden, da eine Kollision der Fäden mit den Klöppeln zum Fadenriss und somit zum Stillsetzen des Flechtprozesses führen würde. Im Falle prozessbedingter Abzugsgeschwindigkeiten mit Richtungswechseln, oder quasi stillstehend, muss ein Flechtring eingesetzt werden (s. Bild 3.17).

Für die Auswahl und Charakterisierung textiler Halbzeuge oder Preforms, für den Einsatz in FV-Bauteilen, spielt die Verstärkungs- und Bindungsstruktur eine entscheidende Rolle (vgl. Kapitel 2.3.4). Zur Vorhersage der mechanischen Eigenschaften im Auslegungsprozess eines belastungsgerechten FV-Bauteils [Pot06, Rob09] werden daher im Wesentlichen der Faservolumengehalt und die Faserorientierung, in Form von idealisierten Materialkenngrößen, berücksichtigt. Hauptaufgabe der Prozessbeschreibung des Überflechtens zur Herstellung von Preforms ist daher die Abbildung der Flechtfadenpfade auf einem meist vorgegebenem Flechtkern, unter Berücksichtigung der gewählten Bindung und der über die Maschinenkonfiguration definierten Prozessparameter, um den Flechtwinkel (elementar für die Faserorientierung der Verstärkungsfasern) sowie die Flechtdichte (elementar für den Faservolumengehalt des Geflechtes) zu bestimmen. Um von einer quasi realen Prozessbeschreibung sprechen zu können, müssen jedoch alle reibungsbehafteten Gleiteffekte an Kontaktstellen, die mechanischen Eigenschaften der Flechtfäden (Garnsteifigkeit) und die prozessbedingten Fadenspannungen berücksichtigt werden. Weiterhin spielen die Beschaffenheit und der Aufbau des Flechtmaterials, hinsichtlich dessen Deformationseigenschaften (Querschnittsausprägung durch Kompressibilität) bei der Ablage auf dem Flechtkern und in Interaktion mit anderen Flechtfäden, eine Rolle.

In Analogie zur Abbildung des Drapierverhaltens kommen zur Vorhersage der Flechtfadenpfade numerische Modelle zur Beschreibung des Überflechtprozesses zum Einsatz. Als Ausgangspunkt sind auf der analytischen Geometrie basierende Ansätze zur Kalkulation der Flechtleistung und der Flechtdichte, bei rotationssymmetrischen Flechtkernen mit konstantem Querschnitt (s. Gleichung (2.3)) und gefordertem Flechtwinkel (s. Gleichung (2.1)), zu betrachten. Bereits Rosenbaum [Roe91] verwendet ein kinematisches Modell zur geschlossenen vektoriellen Beschreibung des Überflechtens formgebender Flechtkerne im idealen Flechtprozess. Die Flechtkerne werden vereinfacht

durch im Raum orientierte und aneinandergereihte Kegelstümpfe vorgegeben, und alle reibungsbehafteten Gleiteffekte an Kontaktstellen, die mechanischen Eigenschaften der Flechtfäden und Fadenabzugsspannungen, werden vernachlässigt. Dieses Vorgehen erlaubt eine Parameterdarstellung des Flechtprozesses und deren explizite analytische Lösung von den zeitabhängigen Vektoren der Fadenabzugspunkte der Klöppel und der zeit- sowie geometriebedingten Kontaktstellen am Flechtkern nach den gesuchten Größen; Flechtwinkel und Flechtdichte. Auch P. Potluri [Pot03] und A. Rawal et al. [Raw05, Raw07] greifen auf eine Parameterdarstellung der Flechtfadenpfade, unter Berücksichtigung der Prozessparameter, zurück. Im Gegensatz zu Rosenbaum [Roe91] kommen hier, neben den Kegelstümpfen, auch Zylinder, Quader und Pyramidenstümpfe als Flechtkernrepräsentanten zum Einsatz. Die Flechtfadenpfade werden in Form von Raumkurven visualisiert und zur Verwendung in weiterführenden Berechnungen mit repräsentativen Fadenquerschnitten aufgedickt. In Abstimmung mit realen Versuchen müssen jedoch in beiden beschriebenen Varianten Korrekturfaktoren für die einzelnen Flechtmaterialien aus einer textilen Einheitszelle evaluiert und zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften im Auslegungsprozess verrechnet werden.

Von Kessels [Kes02] und Akkerman et al. [Akk06] wird eine implizite numerische Beschreibung des Überflechtens von nichtrotationssymmetrischen und nicht vereinfachten Flechtkernen im ebenfalls kinematischen Modell in Parameterdarstellung gezeigt. Auch in diesem Ansatz erfolgt keine Modellbildung für die reibungsbehafteten Gleiteffekte an Kontaktstellen, die mechanischen Eigenschaften der Flechtfäden und Fadenabzugsspannungen. Diese fehlende Abbildung physikalischer Effekte erlaubt keine Vorhersage der Verformungseffekte an nichtrotationssymmetrischen Flechtkernquerschnitten, an den lateralen Kontaktstellen der Flechtfäden untereinander oder dem Abgleiten der Flechtfäden an Flechtkernquerschnittsänderungen. Demzufolge ist die Abbildung der Flechtfadenpfade und der Flechtwinkel nur eingeschränkt exakt, jedoch mit nur geringem Zeitaufwand kalkulierbar. Mit Hilfe der inversen Kinematik werden derartige Modelle verwendet, um die ideale Maschinenkonfiguration zum Überflechten vorgegebener Kerngeometrien zu berechnen. [Bir13, Rav14]

Zur Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften der Flechtfäden wird von A. Pickett et al. [Pic09a] der explizite Solver des FEM Programms PAM-Crash eingesetzt. Demnach werden die Ergebnisse der explizit analytischen Lösung eines kinematischen Modells, in Anlehnung an A. Rawal et al. [Raw05, Raw07], mit den Ergebnissen eines FEM-Modells verglichen. Ausgangspunkt der realen Versuche zur Validierung ist eine triaxiale 2D-Flechtstruktur, abgelegt auf einem rotationssymmetrischen und aus Regelgeometrien zusammengesetzten Flechtkern. Zusätzlich wurden Versuchsaufbauten zur Ermittlung der Reibwerte nach dem Coulombschen Reibgesetz zwischen Flechtfäden untereinander und den Flechtfäden bei der Ablage auf dem Flechtkern, sowie zur Ermittlung der Garnsteifigkeit aufgebaut und im FEM-Modell implementiert. Im FEM-Modell selbst werden die Flechtfäden (Multifilamente) als vorgespannte Stabelemente und der Flechtkern sowie der Flechtring aus Schalenelementen modelliert.

Vor allem die mechanischen Eigenschaften der Multifilamente (hohe Steifigkeit in Faserrichtung, Verformbarkeit quer zum Roving, geringe Biegesteifigkeit) und die Vielzahl an Kontaktbedingungen führen zu einer langen Rechenzeit. Im Vergleich mit der analytischen Lösung können mit dem FEM-Modell jedoch für formgebende Flechtkerne deutliche bessere Übereinstimmungen mit dem realen Versuch erzielt werden (s. **Bild 3.19**, rechts). Für zylindrische Flechtkerne kann eine gute Übereinstimmung der realen Versuche, dem FEM-Modell und dem analytischen Modell, erzielt werden (s. **Bild 3.19**, links). Weiterhin zeigt A. Pickett et al. [Pic09b] die Weiterverarbeitung der Ergebnisse aus dem FEM-Modell mit Hilfe der Aufbereitung eines 3D-Modells aus Volumenelementen mit elastisch-plastischem Materialmodell in Einheitszellen. Dadurch können Aussagen über die Steifigkeitseigenschaften des gesamten Geflechts (Verbundkörpers) getroffen werden.

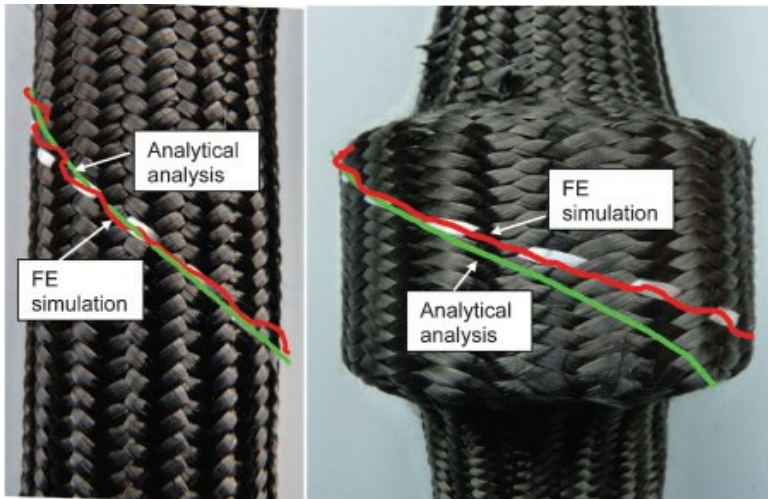


Bild 3.19: zylindrischer Flechkern (links); formgebender Flechkern (rechts)  
[Pic09a]

Um die Beschaffenheit und den Aufbau des Flechtmaterials (Multifilament/Roving) hinsichtlich dessen Deformationseigenschaften unter den prozessbedingten Fadenspannungen in einem numerischen Modell zu berücksichtigen, stellt H. Finckh [Fin04] die eigens für diesen Zweck entwickelten Einzelfilament- und Garnmodelle vor. Im Gegensatz zu den Stabelementen kann die Querschnittsdeformation, resultierend aus den reibungsbehafteten Gleitvorgängen im textilen Fertigungsprozess, direkt berücksichtigt werden. Um den Übergang vom runden zum elliptischen Querschnitt und die resultierenden Veränderungen der mechanischen Eigenschaften abbilden zu können, werden die Einzelfilament- und Garnmodelle aus mehreren Stabelementen und spezifisch für jeden Werkstoff aufgebaut. Durch diesen Aufbau steigen die Anzahl an Elementen und die Anzahl an Kontakten im Modell erheblich. Daraus resultieren gesteigerte Berechnungszeiten und eine größere Wahrscheinlichkeit von auftretenden Instabilitäten.

### 3.3 Flechtmaschinen nach dem Rotorflechtmaschinen System

#### 3.3.1 Verlegetechnik und Funktionsweise der Rotorflechtmaschinen

Konventionelle Rotorflechtmaschinen - beispielsweise Hebelflechtmaschinen nach dem Schnellflechtmaschinen System „Horn“ - werden in der Regel zum Überflechten technischer Schläuche oder elektrischer Kabel [DIN20018-1, DINEN853, DINEN857, DIN20021, DIN89158] eingesetzt. Primär kommen bei diesem speziellen Rundflechtverfahren metallische Flechtmaterialien zum Einsatz, die besondere Anforderungen bei ihrer Verarbeitung aufweisen. Typische Anwendungsgebiete sind Kabel mit Kupfergeflecht (s. **Bild 3.20**) als metallische Schutzhülle und zur elektromagnetischen Isolation (z.B. Koaxialkabel) oder Schläuche mit Textil- bzw. Stahlgeflecht zur Verstärkung der Struktur (z.B. Hydraulikschläuche, Benzinleitungen, Feuerwehrschräuche). Der technologische Vorteil des Systems „Horn“ liegt zum einen in der Homogenität des Flechtprodukts; zum anderen in der signifikant höheren Flechtgeschwindigkeit im Gegensatz zu den Rund- oder Radialflechtmaschinen. [Dou64]

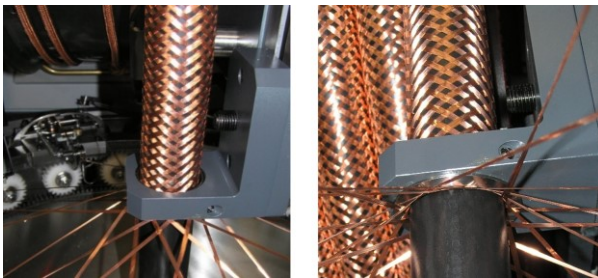


Bild 3.20: Kupfergeflecht im Flechtpunkt [Nie15]

Der grundlegende Aufbau aller konventionellen Rotorflechtmaschinen ist historisch bedingt ähnlich und unterscheidet sich im Wesentlichen durch die Anordnung der Spulen und durch das Antriebskonzept der Flechtfadenverlegung. Dieser Aufbau stellt nicht zuletzt die Basis zur Leistungssteigerung der konventionellen Maschinentechnik durch partielle Optimierung (vgl. Kapitel



4.5) dar. Als Vorbild dient das von der **Standard Machine Works** in Nottingham entwickelte Prinzip zweier gegengleich rotierender Spulenträgersätze. Demnach erfährt, im Gegensatz zum Gangbahn-Flügelrad System, nicht jeder Spulenträger unmittelbar die Verlegebewegung. Der Spulenträger ist, analog dem Klöppel, eine Vorrichtung, an welcher eine Spule mit Flechtmaterial um ihre Längsachse drehbar gelagert wird. Heute auf dem Markt erhältliche Rotorflechtmaschinen basieren in der Regel auf dem Antriebskonzept der zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Guido Horn in Berlin-Weißensee entwickelten Schnellflechtmaschinen, oder der von Simon W. Wardwell entwickelten Wardwellians bzw. Deflektorflechtmaschinen.

Im folgenden **Bild 3.21** (rechts) wird die prinzipielle Funktionsweise des Schnellflechtmaschinen Systems „Horn“ gezeigt und dem Flechtkopf einer Hebelflechtmachine der Firma **Spirka Schnellflechter** (s. Bild 3.21 links) zugeordnet. Zur Verlegung der Flechtfäden entlang einer angenäherten Hohlkugel um den Flechtpunkt, rotiert der innere Spulenträgersatz (Flechtfadensystem 1 für Schussfäden) auf einem Breitengrad um die Maschinenhauptachse, während der äußere Spulenträgersatz (Flechtfadensystem 2 für Kettfäden) mit der gleichen Geschwindigkeit in der entgegengesetzten Richtung zum inneren Spulenträgersatz rotiert. Aufgrund der ausrichtungskonstanten Spulenanordnung weist jeder Flechtfaden während der Verlegebewegung vom Fadenabzugspunkt jedes Spulenträgers, bis hin zum Flechtpunkt, die gleiche Länge auf (Kugelradius).

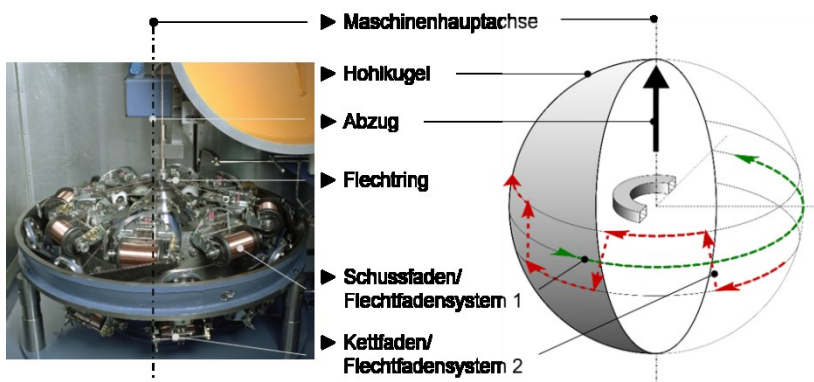


Bild 3.21: Hebelflechter (links) [Spi15b]; System „Horn“ (rechts)

Um ein Geflecht zu erzeugen, kreist der innere Spulenträgersatz mit den Schussfäden auf einem konstanten Breitengrad um die Maschinenhauptachse. Wohingegen die Kettfäden über ein Fadenstellglied vom äußeren Spulenträgersatz abgezogen und von einem tiefer gelegenen Breitengrad zu einem höher gelegenen Breitengrad verlegt werden. Die Kettfadenverlegung stellt sich als oszillierende und stark nichtlineare Relativbewegung dar und ist ausschlaggebend für die Leistungsbeschränkung der konventionellen Maschinentechnik. Jeder Kettfaden bildet dadurch Fächer - ähnlich dem Webprozess - aus, die engen geometrischen sowie zeitlichen Restriktionen unterliegen, um die Schussfäden kollisionsfrei verlegen zu können. Das Fadenführungselement zur Verlegung der Kettfäden wird mit Hilfe einer maschinentypabhängigen Kettfadenverlegeeinrichtung, entlang der bindungsabhängigen Kettfadenverlegekurve, geführt. Mit der im Bild 3.21 gezeigten Kettfadenverlegekurve ist demzufolge nur eine beispielhafte und stark vereinfachte Bahnkurve dargestellt. Die Schussfäden der inneren Spulenträger werden direkt über Fadenführungselemente abgezogen. Der Flechtring ist, im Gegensatz zu den Rund- oder Radialflechtmaschinen existenzieller Bestandteil zum Fixieren des Flechtprozesses im Flechtpunkt. Das Geflecht wird in den meisten Anwendungsfällen auf einem zylindrischen Flechtkern abgelegt und von einer Abzugsscheibe oder -raupe abgezogen. Dazu wird der Flechtkern entlang der Maschinenhauptachse zugeführt, in Abzugsrichtung durch den Flechtring gezogen, durch das Zusammenziehen der Flechtfäden kraftschlüssig in das Geflecht eingebunden und als Verbund abgezogen. Grundsätzlich ist aber auch die Fertigung von Rundgeflechten ohne Flechtkern (hohle Schlauchgeflechte) möglich.

Das Flechtmaterial wird analog den Rundflechtmaschinen mit definierter und möglichst konstanter Fadenabzugsspannung von den Spulen abgezogen. Die Spulen sind in sogenannten Spulenträgern, mit grundsätzlich identischen Funktionalitäten wie die bereits vorgestellten Klöppel, gelagert. Auch hier wird die Fadenspannung meist durch eine mechanisch-passive Tänzerregelung mit Federvorspannung, in Verbindung mit einem Ausgleichsmechanismus, realisiert. Ein beispielhaftes Funktionsprinzip eines Spulenträgers zur Feindrahtverarbeitung ist im **Bild 3.22** dargestellt. Der Fadenabzugspunkt ist der Maschinenhauptachse am nächsten liegende Punkt der Spulenträgergeometrie und ermöglicht einen zerstörungs- und kollisionsfreien Abzug. Um eine

konstante Fadenabzugsspannung einzustellen, wird der Flechtfaden am Fadenabzugspunkt zwischen eine Exzenterrolle und eine Blattfeder geklemmt. Bei Fadenbedarf führt die erhöhte Fadenspannung zum Auslenken des vorgespannten Ausgleichsmechanismus und zum Abheben der Exzenterrolle. Die benötigte Fadenmenge kann somit von der Spule abgezogen werden. Für einen definierten Abzug ist die Spule durch eine Bandbremse gesichert. Die materialabhängige Fadenabzugsspannung wird durch Einstellmöglichkeiten an der Bandbremse sowie durch die Federkennlinie der Feder am Ausgleichsmechanismus eingestellt. Auch für Rotorflechtmaschinen gibt es eine Vielzahl an Spulenträgervarianten (vgl. [Mir15]), die in Abhängigkeit zur Anordnung der Spulenchse hinsichtlich der Maschinenhauptachse oder dem zu verarbeitenden Flechtmaterial stehen.

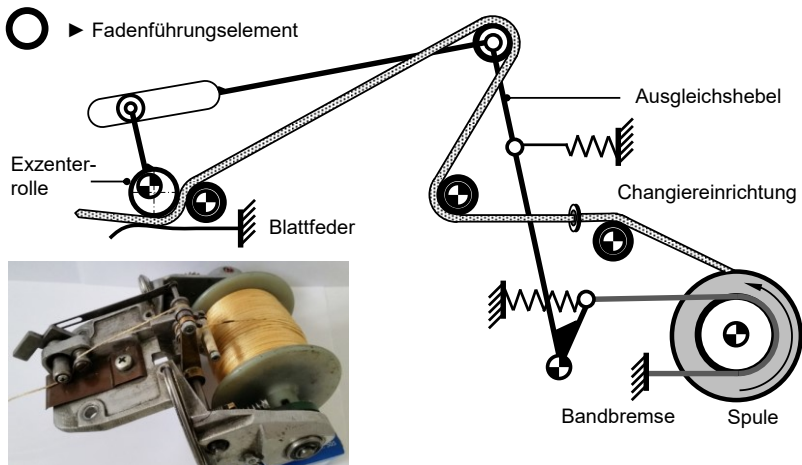


Bild 3.22: Funktionsprinzip eines Spulenträgers zur Feindrahtverarbeitung

### 3.3.2 Umlaufrad- und Hebelflechtmaschinen

In typischen Schnelflechtmaschinen oder auch Hebelflechtmaschinen [Mul13] ist die Anordnung der Spulennachsen beider Flechtfadensysteme, im Gegensatz zu den Rund- oder Radialflechtmaschinen, tangential zur Maschinenhauptachse. Wie im **Bild 3.23** schematisiert, rotieren die beiden Spulenträgersätze gegengleich, innerhalb eines ortsfesten, äußeren Nutkurvenrings um die Maschinenhauptachse. Die Kettfäden werden durch jedem äußeren Spulenträger zugeordnete Fadenhebel um die entgegengesetzt rotierenden, inneren Spulenträger herumgeführt. Mit Hilfe dieser Fadenhebel wird das Flechtmaterial von der Spule abgezogen und über ein Fadenabzugselement zur Fachbildung, entlang der sinusähnlichen Kettfadenverlegekurve, geführt.

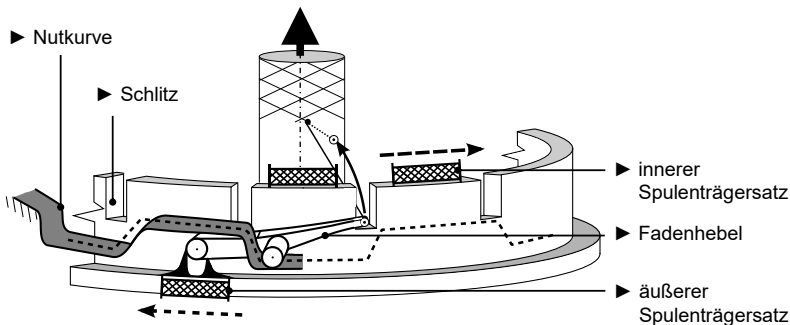


Bild 3.23: Schematischer Aufbau einer Hebelflechtmaschine

Zur Erzeugung des Bewegungsverlaufs des Fadenhebels wird dieser zum einen in der Kurvenführung (Steuerkurve) eines feststehenden Nutkurvenrings mit einem Schiffchen geführt, und zum anderen beweglich am im Uhrzeigersinn rotierenden Kettfadenrotor gelagert. Die Kurvenführung bewirkt, dass sich der Fadenhebel schwingend auf und ab bewegt und somit den Kettfaden über bzw. unter den Schussfäden verlegt. In handelsüblichen Hebelflechtmaschinen ist die Kurvenführung für ein homogenes Geflecht mit einer Bindung 1 über 1 oder 2 über 2 ausgelegt. Der innere Spulenträgersatz rotiert entgegengesetzt dem äußeren Spulenträgersatz auf einer Gleitbahn in Form einer offenen Gleitführung. Um die oszillierende Relativbewegung zur Fachbildung

zerstörungsfrei zu ermöglichen, ist die Gleitführung in konstanten Abständen geschlitz. Der Antrieb des inneren Spulenträgersatzes erfolgt mit Hilfe eines gekoppelten Umlaufrädergetriebes im Inneren des sogenannten Flechtkopfs. [Dou64]

Die technologischen Vorgaben des Systems „Horn“ werden noch heute von der Firma **Spirka Schnellflechter** [Spi15b] umgesetzt. Die Hebelflechtmaschinen der „DF Baureihe“ (s. **Bild 3.24**, links) werden abhängig vom Maschinentyp mit 12, 16 oder 24 Spulen zur Verarbeitung von Flachdraht aus blankem oder beschichtetem Kupfer, Aluminium oder Stahl, bei einer maximalen Flechtgeschwindigkeit von 165 Rotorumdrehungen pro Minute, angeboten. Weniger bedeutende Interpretationen des Systems „Horn“ sind die Umlauf(rad)flechtmaschinen (s. **Bild 3.24**, rechts) [Pap05, Bel05] [Hor20a, Hor20b]. Auch hier ist die Anordnung der Spulenachsen beider Flechtfadensysteme tangential zur Maschinenhauptachse. Die beiden Spulenträgersätze rotieren gegengleich, innerhalb eines feststehenden äußeren Zahnkranzes, um die Maschinenhauptachse. Die Kettfäden werden durch jedem äußeren Spulenträger zugeordnete Umlaufräder, um die entgegengesetzt rotierenden, inneren Spulenträger herumgeführt. Die Umlaufräder rollen auf dem festen Zahnkranz ab und das Flechtmaterial wird durch an den Rändern der Umlaufräder angebrachte Fadenführungselemente zur Fachbildung, entlang der zyklidenförmigen Kettfadenverlegekurve geführt. Umlaufflechtmaschinen ermöglichen es gleichmäßige Geflechte mit einer Bindung 1 über 1, 2 über 1 oder 3 über 1 zu erzeugen. Auch hier erfolgt der Antrieb des inneren Spulenträgersatzes mit Hilfe eines gekoppelten Umlaufrädergetriebes im Flechtkopf.

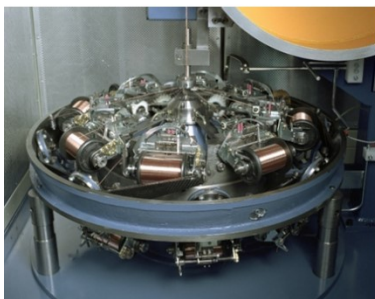
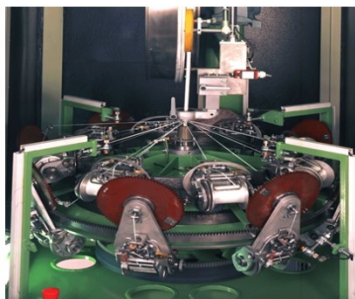
**Hebelflechter****Umlaufflechter**

Bild 3.24: Hebelflechter (links) [Spi15b]; Umlaufflechter (rechts) [Spi15b]

Die derzeit marktführenden Hebelflechtmaschinen zur Kabelfertigung werden seit 2003 von der **Maschinenfabrik NIEHOFF** [Nie15], mit Hauptsitz in Schwabach, als „BMV Baureihe“ (s. **Bild 3.25**) produziert und vertrieben. Laut Herstellerangaben ist die BMV 16 die schnellste und nachweislich auch für den Dauerproduktionseinsatz taugliche 16-spulige Rotorflechtmaschine, die abhängig von Produkt und Anlagenkonfiguration bei maximal 185 Rotorumdrehungen pro Minute betrieben werden kann. Mit den BMV Rotorflechtmaschinen kann, laut Firmenangaben, Rund- oder Flachdraht aus blankem oder beschichtetem Kupfer, Aluminium oder Stahl, Garn und Kunststofffasern verarbeitet werden. Das Flechtmaterial wird abhängig vom Maschinentyp von 12 bis maximal 24 Spulen abgezogen.

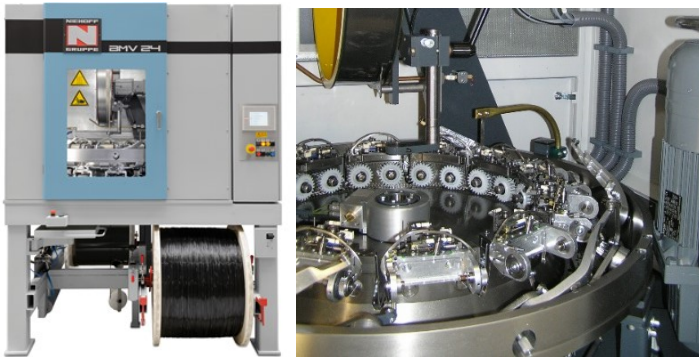


Bild 3.25: BMV Rotorflechtmaschine [Nie15]

Aus den Herstellerangaben ergeben sich steigungsabhängige Produktionsleistungen von 16-spuligen Hebelflechtmaschinen (bei einer Bindung von 2 über 2 und 185 U/min der Spulenträgersätze) zwischen 0,48 m/min (bei kleinster Steigung von 3 mm) und 19,2 m/min (bei einer Steigung von 120 mm). Flechtmaschinen sind infolge dieser vergleichsweise geringen Längenaustragung nur mit Einschränkungen in kontinuierlichen Produktionslinien zu betreiben, wie es z. B. von der Adernfertigung oder bei Extrudiermaschinen bekannt ist. Dies gilt genauso für die Verwendung der Flechtmaschinen in der Schlauch- oder Kabelfertigung. Entsprechend dieser genannten Leistungsgrenzen bedarf es einer Vielzahl von Flechtmaschinen für eine Kabelfabrik. Mittlere europäische Kabelwerke, wie zum Beispiel Lapp, Stuttgart [Lap15],

oder Leoni, Georgensgmünd [Leo15], verfügen im Schnitt über 60 bis 100 Maschinen, um die gängigen Produktionen bearbeiten zu können.

Optional ist ein Folieneinlauf zum Aufbringen von Folie unter dem Geflecht, ein Zentralabwickler zum Bebändern des umflochtenen Kabels mit einer Metallfolie/Textilband, oder ein Leerspulenerkennungssystem vorsehbar. Standardmäßig wird beispielsweise die BMV 16 / 24 mit einem Ab- und Aufwickler „BAS 800.1“ angeboten. Der mechanisch gebremste Abwickler dient der Zuführung des zu überflechtenden Kabels. Das fertige Kabel wird mit dem direkt angetriebenen Aufwickler abgezogen und durch ein Rollringgetriebe aufgespult. Zusammen mit den Drahtziehenanlagen und den Umspulautomaten der Baureihen DSA und DSH, deckt die Maschinenfabrik Niehoff den gesamten Fertigungsprozess vom Drahtziehen über das Umspulen bis hin zum Überflechten und dem Aufwickeln des fertigen Kabels ab. [Nie15]

### 3.3.3 Deflektorflechtmaschine

Die Firma **Spirka Schnellflechter** ist ebenso wie die Firma **Wardwell Braiding** aus Rhode Island, USA, in die **WILMS-Gruppe** eingebunden [War15a]. Mit den technologischen Vorgaben von Simon Wardwell werden die Deflektorflechtmaschinen „Rapid Braider“ [War15c] oder „Speedmaster“ [War15c] angeboten. Eine typische Deflektorflechtmaschine ist im **Bild 3.26** (links) und deren charakteristische Spulenanordnung im **Bild 3.26** (rechts) dargestellt.

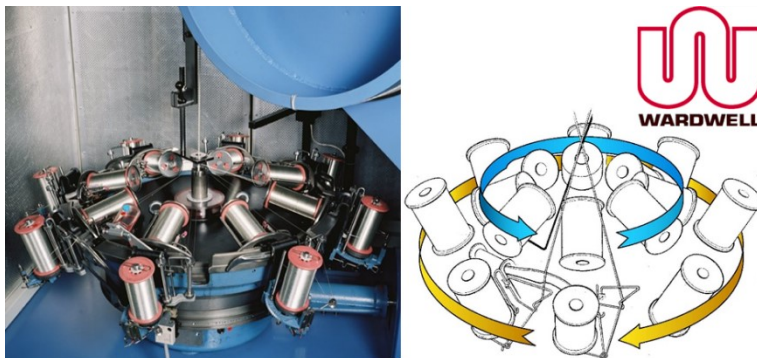


Bild 3.26: Deflektorflechtmaschine (links) [War15c]; Spulenanordnung (rechts) [Bau99]

Die Kettfäden werden durch jedem äußeren Spulenträger zugeordneten, und entlang einer Geradföhrung in Richtung der Spulenachse geföhrten, Fadenabzugselementen und Leitblechen (Deflektoren) zu der erforderlichen Verlegebewegung gezwungen. Der innere Spulenträgersatz wird mit einer aufwendigen Kombination aus einem Nutkurvengetriebe und zwei Stößeln pro Spulenträger realisiert. Mindestens einer der beiden Stößel ist im Eingriff mit dem Spulenträger und transportiert diesen entlang einer kreisförmigen Föhrung. Um die Verlegung des Kettfadens zu ermöglichen, wird einer der beiden Stößel über die Kurvenföhrung aus dem Spulenträger gelöst und der Flechtfaden kann unter dem Träger hindurchgeföhrt werden. Bis der Flechtfaden den nächsten Stößel erreicht, wird der erste Stößel durch die Kurvenföhrung zurück in Eingriff mit dem Spulenträger gebracht und der zweite Stößel löst sich. Der Flechtfaden kann somit den nächsten Spulenträger in einer Aufwärtsbewegung passieren. Mit Deflektorflechtmaschinen kann die Bindung 2 über 2 oder 1 über 1 produziert werden.

### 3.3.4 Magnatech RB-2TM

Die Firma **Magnatech** in Reading, Pennsylvania, USA [Mag15a], geht aus der Firma **Textile Machine Works**, gegründet von Henry Janssen [Jan06] und Ferdinand Thun [Thu11, Rah07], hervor. Um 1930 begann die Fertigung von Flechtmaschinen für Hydraulikanwendungen und wird von der Firma **Magnatech** mit der Rotorflechtmaschine RB-2<sup>TM</sup> Rotary Wire & Textile Braider (s. **Bild 3.27**) fortgeföhrte. Die beiden Spulenträgersätze rotieren gegengleich und in ähnlicher Spulenanordnung wie in den Deflektorflechtmaschinen (s. Bild 3.26, rechts). Die Fadenverlegung der Kettfäden erfolgt erfindungsgemäß, wie in US-Patent 5775195 [Hae98] „*Rotary Braider Machine*“ von Rudolf Hähnel und Xing Li beschrieben, über Fadenföhrungselemente an einer schwingenden Schleife. Die Kettfäden werden durch jedem äußeren Spulenträger zugeordnete, achtegliedrige Dreistandgetriebe verlegt. Mit Hilfe der Koppeltriebestruktur wird eine rotierende Antriebsbewegung in eine spezifische, kreisabschnittsförmige Schwingbewegung übersetzt. Zur Schussfadenverlegung kommt bereits in der RB-2<sup>TM</sup> eine wälzgelagerte Rollenbahnföhrung als gleichwertiger Ersatz der Gleitföhrung zum Einsatz. Grundsätzlich wurden damit das Funktionsprinzip und die konstruktive Machbarkeit einer wälzgelagerten Rollenbahnföhrung unter Einsatzbedingungen nachgewiesen.





Bild 3.27: RB-2TM; Rotary Wire & Textile Braider [Mag15b]



## **4 Parameteridentifikation der Flechtsysteme zum Überflechten**

### **4.1 Präzisierung der Aufgabenstellung**

Die spezifischen Vorteile des Systems „Horn“ gegenüber dem Gangbahn-Flügelrad System liegen in der speziellen Verlegetechnik, in Verbindung mit der abzugsideal und ausrichtungskonstanten Spulenanordnung, tangential zur Maschinenhauptachse. Aus der tangentialen Spulenanordnung im antriebstechnischen Gesamtkonzept resultieren eine quasi lageparallele Ablage des Flechtmaterials auf dem Flecht kern und die einhergehende Homogenität des Flechtprodukts. Die ausrichtungskonstante Spulenanordnung wird durch die separate Verlegung der Kettfäden mit Hilfe je einer Kettfadenverlegeeinrichtung ermöglicht. Demnach wird, im Gegensatz zum Gangbahn-Flügelrad System, die direkte Überlagerung der idealen Verlegebewegung durch das unmittelbare Verlegen der Flecht fäden entlang einer Gangbahn vermieden. Daraus resultiert die quasi lageparallele Verarbeitung des Flechtmaterials in Analogie zum idealisierten und lageparallelen Umwickeln. Die ausrichtungskonstante Spulenanordnung ermöglicht zudem ein faserschonendes Abzugsverhalten ohne Umlenkung, senkrecht gegen die Bandebene der Rovings. In Summe bietet das System „Horn“ hervorragende Voraussetzung zur Fertigung qualitativ hochwertiger Preforms. Gleichzeitig ist die gesteigerte Flechtgeschwindigkeit, aufgrund des Maschinenkonzepts mit der gegengleichen Rotationsbewegung zweier Rotoren, für eine wirtschaftliche Serienfertigung von enormem Vorteil.

Vor allem der konzeptionelle Aufbau von Hebelflechtmaschinen ist aus technologischer Sicht ungeeignet zur Preformherstellung, da hiermit in der Regel Feindrahtmaterialien aus zwei Flechtfadensystemen zu Schlauch- oder Kabelarmierungen mit konstantem und kreisförmigem Querschnitt verarbeitet werden. Um die technologischen Vorteile des Systems „Horn“ auszuschöpfen und direkt in konventionelle Fertigungsprozesse zur Fertigung von Preforms zu integrieren, bestand demnach die zentrale Aufgabe in der Synthese einer Flechtvorrichtung und eines entsprechenden Flechtverfahrens zum kontinuierlichen Überflechten mit drei Fadensystemen. Zur definierten Ablage der

Verstärkungsfasern auf einen multiaxial geführten Flechtkern musste ein ringförmiges Antriebskonzept mit großer Durchgangsöffnung vorgesehen und die abzugsideale und ausrichtungskonstante Spulenanordnung, in Kombination mit dem rotierenden Antrieb, beibehalten werden. Die daraus hervorgehenden Kernaufgaben waren zum einen die Integration eines dritten Fadensystems in eine faserschonende und antriebstechnisch umsetzbare Verlegetechnik zur Fertigung einer triaxialen Flechtstruktur; zum anderen die Synthese der Antriebstechnik für ein neues ringförmiges Antriebskonzept mit großer Durchgangsöffnung. Die Herausforderung dabei lag in der zielführenden Technologiesynthese zur technologisch geeigneten und technisch machbaren Kombination der systembedingten Vorteile, um den strukturellen Anforderungen an ein Preform gerecht zu werden.

Für die Synthese der Antriebstechnik zur kinematisch optimalen und lageparallelen Verlegung von mindestens drei Flechtfadensystemen wurde eine prozessorientierte Synthesemethodik erarbeitet. Ausgangspunkt dieser Methodik war ein Synthesemodell mit direkter Kopplung an eine kinematische Prozesssimulation zur Synchronisation und Optimierung der Flechtfadenverlegung. Die Prozesssimulation zielte auf die kinematische Abbildung der Verlegebewegungen und der grundlegenden Prozessfunktionalitäten, wie der Flechtfadenablage und der Kollisionsräume der Flechtfäden, ab. Die Synchronisation und Gestaltung der Flechtfadenverlegung erfolgte durch die iterative Mechanismensynthese, in enger Verknüpfung mit der kinematischen Analyse des neuartigen Antriebskonzepts, sowie der Beurteilung der Prozessfunktionalitäten. Die Aufgabe beim Aufbau des Synthesemodells lag in der hinreichend genauen Abbildung des Flechtprozesses im CAD- und CAE-Umfeld unter entsprechender Berücksichtigung der Rechenzeiten. Ein Modellaufbau mit der Modellierung von reibungsbehafteten Gleitvorgängen an den Kontaktstellen beim Zusammenziehen des Geflechts sowie der Ablage auf dem Flechtkern war für diesen Zweck unverhältnismäßig. Für den Syntheseprozess bot sich die idealisierte Modellbildung zur effektiven Visualisierung des Prozesses an.

Ausgangspunkt der Syntheseaufgabe war sowohl die qualitative Analyse der zum Überflechten geeigneten Flechtsysteme als auch deren antriebstechnische sowie konstruktive Ausführung in marktüblichen Hebelflechtmaschinen, sowie den eigens für den genannten Zweck entwickelten Radialflechtmaschinen (s. **Bild 4.1**). Ziel dieser Analyse war die Parameteridentifikation zur sinn-

fälligen Kombination der positiven Eigenschaften und Elemente beider Systeme und deren Berücksichtigung in der Technologiesynthese. Beispielsweise waren die Anhaltspunkte der Kettfadenverlegung für die Antriebstechnik zur kinematisch optimalen Flechtfadenverlegung von entscheidender Bedeutung. Für die maschinentechnische Ausführung war im Wesentlichen die konstruktive Analyse der Schussfadenverlegung relevant.

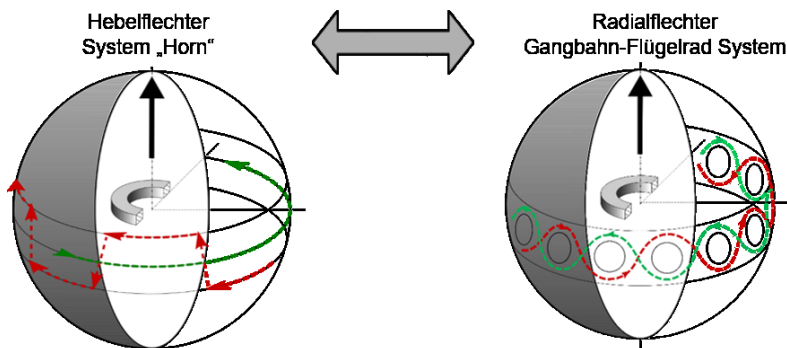


Bild 4.1: Flechtsysteme im Vergleich

Möglichkeiten zur Integration von Stehfäden zur Erzeugung der konventionellen triaxialen Flechtstruktur (s. Bild 2.22) wurden schon von Guido Horn [Hor32] patentiert. Der bislang einzige dokumentierte Aufbau einer Rotorflechtmaschine mit drei Flechtfadensystemen zur Verarbeitung von Kohlenstofffaser Rovings, ist im US-Patent 5913959 [Kle99b] „*Rotably Driven Braiding Machine with Third Yarn Carried and Delivered By Stationary Carriages About a Braiding Point*“ von den Erfindern John T. Klein, Roy M. Broughton Jr. und David G. Beale beschrieben. Nach D. Branscomb, D. Beal und R. Broughton [Bra13] handelt es sich bei dem entstehenden Flechtprodukt um ein „*True triaxial braid*“ [Kle99a]. Lizenznehmer des Patents ist die Firma **Steeger USA** [Aub15]. Es sind keine weiterführenden Informationen zum Einsatz oder Vertrieb der speziellen Rotorflechtmaschine bekannt. Das Antriebskonzept zur Flechtfadenverlegung, bzw. das vorgeschlagene Zuführkonzept der Stehfäden, erscheint in beiden Fällen, nach Auswertung der Patentschriften, in Bezug auf die schadigungsarme Verarbeitung der Flechtmaterialien fragwürdig und zur Herstellung von textilen Halbzeugen oder endkonturnahen Preforms nach dem publizierten Stand der Forschung ungeeignet.

Die Technologiesynthese zur Integration des dritten Fadensystems führte zu einem neuartigen textiltechnologischen Fertigungsverfahren mit einer neuen, gewebeartigen Bindungsstruktur als Kombination aus Gelege und Geflecht bzw. Gewebe „D-3FG“ (s. **Bild 4.2**). Das einhergehende Antriebskonzept der neuartigen Rotorflechtmaschine „D-3F“, befindet sich im Verfahren der Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen „102014016832.8“, gemäß **DPMA** (s. **Anlage 9.1**). Die im Rahmen der Patentanmeldung und dem Erstellen der vorliegenden Arbeit recherchierten Schutzrechte erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Eine unabhängige Recherche der **Sächsischen Patent-VerwertungsAgentur** (s. **Anlage 2**) bestätigt jedoch die Ergebnisse. Demnach wird in keinem der herangezogenen Schutzrechte genau der zur Anmeldung gebrachte Patentanspruch beschrieben.

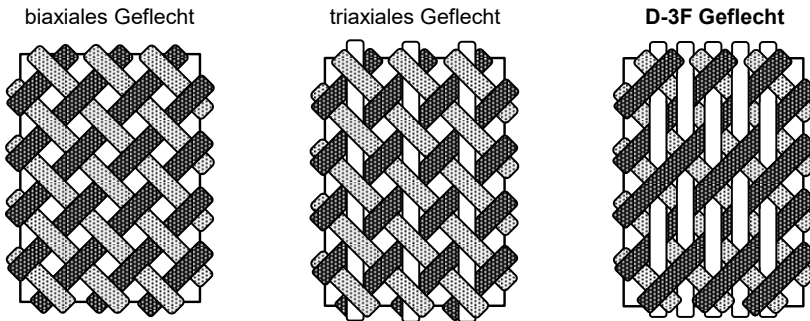


Bild 4.2: Biaxiales, triaxiales und neues „D-3F Geflecht“

## 4.2 Analyse einer Radialflechtmaschine

Ausgangspunkt der Analyse der Verlegetechnik und des Antriebskonzepts einer Radialflechtmaschine (s. Bild 3.11) war die Entwicklung eines virtuellen Modells zur kinematischen Abbildung der Klöppelbewegung. Der parametrische Aufbau wurde nach den Vorgaben zur Kinematik von starren Maschinen mit starren Massen und idealen Gelenken [Dre12], in Anlehnung an die von Büsgen in „*Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen*“ vorgestellten „*Ablauf-Simulation der Klöppelbewegungen*“ [Bue93], aufgebaut. Die Softwareumgebung

*Creo 3.0®* bietet hierfür eine effektive Kombination aus MKS- und CAD-Funktionalitäten. Die werksinternen CAD-Daten der Firma **August Herzog Maschinenfabrik** standen für den Aufbau des Modells nicht zur Verfügung. Alle erzeugten Körper und Bewegungsvorgaben wurden mit Abmessungen aus den bekannten Herstellerangaben und Rechercheergebnissen [LCC15, IFB15, ITA15, ILK15] iterativ aufeinander abgestimmt. Die kinematischen Hauptabmessungen der getriebetechnischen Umsetzung erheben daher keinen Anspruch auf quantitative Exaktheit und dienen ausschließlich der qualitativen Analyse der konzeptbedingten Verlegebewegung.

Die grundlegende Voraussetzung zur Entwicklung des virtuellen Modells wurde mit der getriebetechnischen Analyse des Gangbahn-Flügelrad Systems gelegt. Ausgangspunkt war die Beschreibung des strukturellen Aufbaus der mechanisch-zwangsläufigen Antriebslösung zur Erzeugung des technologiebedingten Bewegungsverlaufs. Aus der partiellen Optimierung des konventionellen Antriebskonzepts, mit horizontaler Ausrichtung der Spulenachsen resultiert der sphärische Aufbau des Getriebes, mit radialer Ausrichtung der Spulenachsen hinsichtlich der Maschinenhauptachse. Aufgrund der Ausrichtung der Spulenachsen und der einhergehenden ringförmigen Gestaltung des Flechtbetts (s. Bild 3.11) müssen die geometrischen und kinematischen Gegebenheiten des Antriebskonzepts derart aufeinander abgestimmt werden, dass die Verlegebewegung der Klöppel kollisionsfrei von statten gehen kann. Das Flechtbett setzt sich aus einzelnen, aneinandergereihten Platten in modularer Bauweise derart zusammen, dass die halbkreisbogenförmigen Gangbahn-Segmente eine zylindrisch ausgeformte Führungsbahn ergeben. Die Flügelräder besitzen eine gleichermaßen radiale Ausrichtung und sind den geometrischen Gegebenheiten entsprechend konstruktiv angepasst, um eine formschlüssige und schlupffreie Bewegungsübertragung zu realisieren.

Für die Analyse des strukturellen Aufbaus ist die isolierte und ebene Betrachtung zweier direkt benachbarter Flügelräder mit einem treibenden Flügelrad zulässig, da alle weiteren benachbarten Flügelräder über die im Eingriff stehenden Stirnräder direkt miteinander verbunden sind und identische Abmessungen besitzen. Der in dieser Weise vereinfachte getriebetechnische Aufbau, bestehend aus zwei Flügelrädern und einem Klöppelfuß sowie der tangentialstetig zusammengesetzten Gangbahn-Segmente, ist in dieser Form

nicht in der herangezogenen Fachliteratur zur Thematik der Aufbaulehre beschrieben. Über die Entstehung dieser Sonderbauform kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur gemutmaßt werden, da keine zeitgenössischen Aufzeichnungen oder Angaben der Hersteller zur Verfügung stehen. In einer möglichen und für die (in **Anlage 9.3** hinterlegte) analytische Berechnung gewählten Variante wurde das Gangbahn-Flügelrad System dem strukturellen Aufbau eines Malteserkreuzgetriebes entlehnt. Ein Malteserkreuz mit vier Stationen weist allein rein optisch erkennbare Ähnlichkeiten zur Flügelscheibe mit vier Flügeln auf, **Bild 4.3**. Das Malteserkreuzgetriebe ist wiederum der schwingenden Kurbelschleife in der Schrittphase kinematisch gleichwertig.

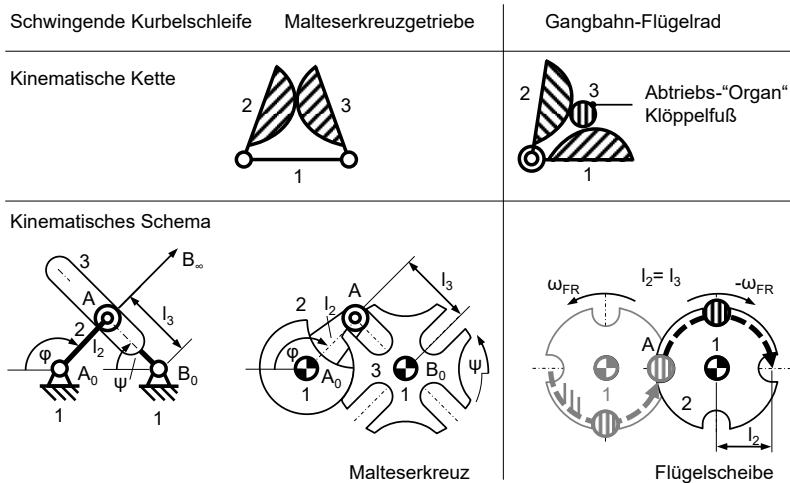


Bild 4.3: Kurbelschleife, Malteserkreuzgetriebe und Gangbahn-Flügelrad

Mit dem Tausch von An- und Abtrieb, dem Zusammenlegen der beiden Gestellpunkte **A<sub>0</sub>** und **B<sub>0</sub>** sowie der Elementarerweiterung des Gelenkpunkts **A** zur kreisbogenförmigen Führungsbahn **k<sub>A</sub>** (Gangbahn als logische Erweiterung der Bogenkulisse) konnte der Grundaufbau des Gangbahn-Flügelrad Systems nachvollziehbar geklärt werden. Demnach wurde der Treiber des Malteserkreuzgetriebes (Organ am Gelenkpunkt A) vom An- zum Abtriebsorgan (Klöpplfuß als logische Erweiterung des Gleitsteins) umfunktioniert. Der



Klöppelfuß wird in starrer Verbindung mit dem eigentlichen Klöppel entlang der Gangbahn geführt. Aus diesem strukturellen und konstruktiven Aufbau der Antriebstechnik zur Fadenverlegung resultiert eine Überlagerung der idealen Verlegebewegung durch die konzeptbedingte sinusförmige Verlegebewegung entlang der Gangbahn. Das Zusammenlegen der beiden Gestellpunkte  $A_0$  und  $B_0$  im Mittelpunkt des kreisbogenförmigen Gangbahnsegments führte zur Sonderabmessung  $l_2$  gleich  $l_3$  (entspricht dem Krümmungsradius  $r_A$ ), mit:

- der Kurbellänge  $l_2$ ; entspricht dem Radius des Kreisbogens
- und dem Abstand des einlaufenden Treibers zum Drehpunkt  $B_0$  gleich  $l_3$ .

Der beschriebene strukturelle Aufbau ist mit einer definitionsgemäßen kinematischen Kette nach Volmer [Vol68] nicht ohne weiteres zu beschreiben. Demnach dient die kinematische Kette der Darstellung des strukturellen Getriebeaufbaus aus Gliedern und Gelenken. Getriebeorgane sind grundsätzlich funktionsrelevante Bestandteile, aber nicht Teil der Darstellungsrichtlinien der kinematischen Kette. Am Beispiel der schwingenden Kurbelschleife ist diese Richtlinie, aufgrund des Formenwechsels und dem Einsetzen eines entsprechenden Gleitwälgelenks, funktionsabbildend und eindeutig (vgl. Bild 4.3). Zur korrekten Darstellung des strukturellen Aufbaus des Gangbahn-Flügelrad Systems, musste das zur Fadenführung herangezogene Organ zum Getriebeelement erweitert werden, um der vorliegenden speziellen Fortführung des Formenwechsels Rechenschaft zu tragen.

Unter Berücksichtigung der zugrunde gelegten kinematischen Kette (s. Bild 4.3), betrachtet für ein Flügelrad und ein Gangbahn-Segment von der einlaufenden Übergabestelle bis zur auslaufenden Übergabestelle, ergibt sich der Getriebefreiheitsgrad  $F$  nach der allgemeinen Gleichung des Getriebefreiheitsgrads für den ebenen Fall:

$$F = 3(n - 1) - 2g_1 - g_2 - \sum_j (f_{id})_j + \sum_k (s_p)_k$$

durch Einsetzen der:

- Anzahl der Getriebeglieder  $n=3$ ,
- Anzahl der Gelenke mit  $f$  gleich 1  $g_1=2$ ,
- Anzahl der Gelenke mit  $f$  gleich 2  $g_2=2$ ,
- Anzahl der identischen Freiheiten  $f_{id}=0$
- Anzahl der passiven Bindungen aufgrund der genannten Sonderabmessung  $s_p=1$

zu:  $F = 3(3 - 1) - 2 * 2 - 2 - 0 + 1 = 1$  (4.2)

Mit konstanter Antriebsdrehzahl am Flügelrad  $n_{FR}$  ergibt sich die konstante Winkel-geschwindigkeit  $\omega_{FR}$  und eine konstante Umfangsgeschwindigkeit des Klöppelfußes  $v_{KF}$  in der kreisbogenförmigen Gangbahn. Aus den im Eingriff stehenden Stirnrädern resultiert ein gegengleicher Drehsinn der jeweils benachbarten Flügelräder, deren Flügel an der Übergabestelle jeweils fluchtend zueinander angeordnet sind. Diese Zuordnung der Flügel ermöglicht die Übergabe des Klöppelfußes an der Schnittstelle der beiden halbkreisförmigen Gangbahnsegmente (s. Bild 3.3 und Bild 3.4). Dabei wird der Klöppelfuß von der ersten Flügelscheibe zur Übergabestelle geführt, läuft schon vor der Übergabestelle in den gegengleich rotierenden Flügel ein, und erst kurz nach der Übergabestelle aus dem ersten Flügel aus, **Bild 4.4**.

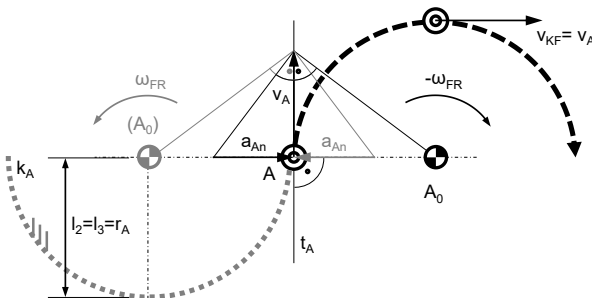


Bild 4.4: Normalbeschleunigung an der Übergabestelle

Nach Douglas [Dou64] sind Rundflechtmaschinen, aufgrund ihrer signifikanten Verlegebewegung, an die Grenze der technisch realisierbaren Flechtgeschwindigkeit gestoßen. Wie bereits von Büsgen [Bue93] beschrieben, führt der kinematische Aufbau zu einem sprunghaften Richtungswechsel der Zentripetalbeschleunigung (Normalbeschleunigung  $a_{An}$ ) an der Übergabestelle, der einen Querruck zur Folge hat. Durch den einhergehenden Richtungswechsel der Zentrifugalkraft wird ein Anlagenwechsel an den Kurvenflanken hervorgerufen (vgl. [VDI2142-1 und VDI2142-2]). Diese zyklisch auftretenden Anlagenwechsel führen zu einer erhöhten Kontaktbelastung im Kurvengelenk des Klöppelfußes mit der Gangbahn und zu einer Schwingungsanregung auf das Flechtbett und auf den Klöppel selbst, die wiederum das dynamische Verhalten der gesamten Flechtmaschine und des Flechtprozesses beeinflussen. Die erhöhten Belastungen führen zum vorzeitigen Verschleiß der Bauteile, einer deutlich hörbaren Geräuschentwicklung, einem Aufschwingen der Flechtfäden und letztendlich zur Leistungsbeschränkung.

Der sprunghafte Wechsel der Normalbeschleunigung lässt sich auf die Geometrie der Gangbahn zurückführen. Zwei derart miteinander verbundene Kreisbögen sind an der Schnittstelle tangentialstetig, aber nicht krümmungstetig. Aus dem Wechsel des Vorzeichens der Krümmung resultiert ein Wechsel der Vorzeichen der Beschleunigung. Im Bild 4.4 wurde der Richtungswechsel der Beschleunigung im infinitesimal kleinen Abstand, vor und nach der Schnittstelle, mit Hilfe des Höhensatzes zeichnerisch konstruiert. Für das Ersatzgetriebe der schwingenden Kurbelschleife (s. Bild 4.3) erfolgte die analytische Berechnung exemplarisch unter Zuhilfenahme der „Mathtool“-Werkzeuge (vgl. [Ber05, Ber06, VDI2729]) in der Berechnungsumgebung von *Mathcad*® (s. **Anlage 9.3**).

Die Gründe der Leistungsbeschränkung wurden bereits im Hinblick auf die Lösungssuche und Synthese der kinematisch optimalen Antriebstechnik zur lageparallelen Verlegung der Flechtfäden in der neuartigen Rotorflechtmaschine „D-3F“ näher betrachtet. Bei der Gangbahn handelt es sich um eine Nutkurvenscheibe mit kreuzender Nutkurve, für die, aufgrund der Kreuzungsstellen (Übergabestellen), zur eindeutigen Richtungsvorgabe ein Schiffchen (in der Kontur des Klöppelfußes) als Eingriffsglied verwendet wird. Nutkurvengetriebe werden grundsätzlich den formschlüssigen Kurvengetrieben zugeordnet, ohne dass sie die Bewegungsübertragung durch einen echten Formschluss zu realisieren. Der Gelenkaufbau ist konstruktiv derart umgesetzt,

dass Spiel durch ein definiertes Aufmaß beim Fertigen der Nutkontur entsteht. Aufgrund der wirkenden Trägheitskräfte und dem gegebenen Spiel, findet bei einer Vorzeichenänderung der Krümmung/Beschleunigung ein Anlagenwechsel des Eingriffsglieds statt. Der konstruktive Gelenkaufbau resultiert aus dem Bestreben eine sprunghaft wechselnde Drehrichtung dieses Eingriffsglieds (Rolle) aufgrund des Anlagenwechsels oder ein Klemmen (Rolle oder Schiffchen) zu vermeiden, sowie die Voraussetzungen zum Aufbau eines Schmierfilms an den Anlageflächen des Kurvengelenks zu schaffen. (vgl. [VDI2142-1 und VDI2142-2])

Um die Auswirkungen der Anlagenwechsel zu verringern, wird nach den Regeln der Technik beispielsweise eine Zwillingsrolle für Nutkurvenscheiben ohne Kreuzungen vorgeschlagen. Ziel des Aufbaus ist es, dass immer mindestens eine der beiden axial zueinander montierten Rollen an der jeweils zugeordneten Kurvengeometrie anliegt. Für die Schiffchen am Klöppelfuß ist eine ähnliche Lösung denkbar, die aber zu einem erhöhten Platzbedarf und einem Mehraufwand an Bauteilen führt. Weiterhin ist konstruktive und fertigungstechnische Expertise notwendig, um einen nahezu spielfreien Gelenkaufbau umsetzen zu können. Gesteigerte Kosten sind dabei unumgänglich. Eine weitere Maßnahme bezieht sich direkt auf die Verminderung des auftretenden Querrucks an der Übergabestelle. Demnach müsste die Kreisbogenform bereichsweise durch ein tangential- und krümmungsstetiges Kurvensegment ersetzt werden. Im Textilmaschinenbau werden für derartige Aufgabenstellungen häufig Polynome 5. Grades zum Bewegungsdesign verwendet. Das Polynom 5. Grades ist mit der Vorgabe der Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Randbedingungen an den beiden Anschlusspunkten bis zur dritten Ableitung stetig sowie stoß- und ruckfrei. Damit müsste das Polynom 5. Grades symmetrisch gelöst werden. [Vol89, VDI2143-1 und VDI2143-2]

### 4.3 Analyse einer Hebelflechtmaschine

Das grundlegende Antriebskonzept einer Hebelflechtmaschine (s. Kapitel 3.3) basiert auf einem gekoppelten Umlaufrädergetriebe zum mechanisch-zwangsläufigen Antrieb beider Fadensysteme mit einer gegengleichen Rotationsbewegung. Im Vordergrund der Analyse stand die kinematische Beschreibung der technologiebedingten Verlegebewegung der Kettfäden, die durch jedem äußeren Spulenträger zugeordnete Fadenhebel erfolgt. Die äußeren Spulenträger sind direkt mit dem Kettfadenrotor verbunden, der in der Regel von einer Zahnriemenstufe konstant im Uhrzeigersinn angetrieben wird. Zur Erzeugung des spezifischen Bewegungsverlaufs ist der Fadenhebel einerseits drehgelenkig am Kettfadenrotor gelagert und steht andererseits über ein Schiffchen im Eingriff mit der Steuerkurve des feststehenden Nutkurvenrings. Durch die konstante Antriebsbewegung des Kettfadenrotors wird das Schiffchen durch den Nutkurvenring gezogen und der Fadenhebel oszillierend bewegt, um den Kettfaden zur Fachbildung über bzw. unter die Schussfäden zu führen. Der innere Spulenträgersatz rotiert entgegengesetzt dem äußeren Spulenträgersatz auf einer offenen Gleitführung, die Bestandteil des Kettfadenrotors ist. Um die oszillierende Verlegebewegung des Kettfadens zu ermöglichen, ist die Gleitführung in äquidistanten Abständen geschlitzt. Der Antrieb des inneren Spulenträgersatzes erfolgt über die Planeten der zweiten Umlaufrädergetriebestufe.

Besonderes Augenmerk lag bei der Parameteridentifikation zur Kombination der positiven Eigenschaften beider Flechtsysteme und deren Berücksichtigung in der Technologiesynthese auf der Kettfadenverlegung konventioneller Hebelflechtmaschinen. Um Anhaltspunkte zur Gestaltung einer fachbildenden Verlegebewegung mit den konstruktiven Gegebenheiten der Schussfadenverlegung zu erhalten, wurde ein parametrisches, virtuelles Modell der Hebelflechtmaschine BMV 16 (s. **Bild 4.5**) für eine Bindung 2 über 2, basierend auf starren Massen und idealen Gelenken, entwickelt. Die werksinternen CAD-Daten der *Maschinenfabrik Niehoff* standen für den Aufbau des Modells nicht zur Verfügung. Alle erzeugten Körper und Bewegungsvorgaben wurden mit Abmessungen aus den bekannten Herstellerangaben und Rechercheergebnissen sowie im Rahmen der Projektbearbeitung des ZIM-Kooperationsprojekts 2022605 zur Verfügung gestellten Daten iterativ aufeinander abge-

stimmt. Die kinematischen Hauptabmessungen der getriebetechnischen Umsetzung erheben daher keinen Anspruch auf quantitative Exaktheit und dienen ausschließlich der qualitativen Analyse der konzeptbedingten Verlegebewegung. Die getriebetechnische Analyse als Voraussetzung zum Aufbau des virtuellen Modells begann mit der Separierung und strukturellen Untergliederung des antriebstechnischen Gesamtkonzepts in das Teilgetriebe zum Antrieb des Kettfadensystems und das Teilgetriebe zum Antrieb und zur Verlegung des Schussfadensystems.

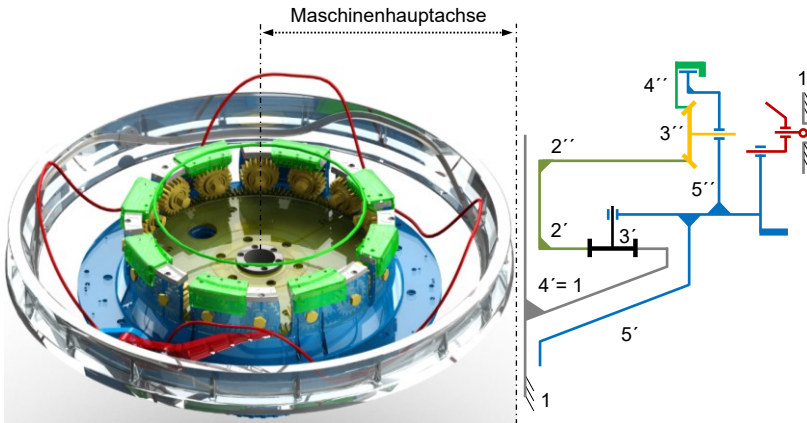


Bild 4.5: Virtuelles Modell (links) Schema (rechts) einer Hebelflechtmachine

Grundsätzlich kann das Teilgetriebe zur Verlegung der Schussfäden als ein gekoppeltes Umlaufrädergetriebe (s. **Bild 4.6**), bestehend aus einem Umlaufräderübersetzungsgetriebe **UG'** im Zweiwellenbetrieb, mit dem Freiheitsgrad 1, und einem Kegelrad-Umlaufrädergetriebe **UG''** im Dreiwellenbetrieb, mit dem Freiheitsgrad 2, betrachtet werden. Diese Umlaufrädergetriebe sind über den Steg **5 / C** (entspricht dem Kettfadenrotor) und das außenverzahnte Zentralrad **2 / D** miteinander gekoppelt. Darüber hinaus wurde das Teilgetriebe im Gesamtkonzept derart umgesetzt, dass ein mechanisch-zwangläufiger Antrieb beider Fadensysteme mit einer gegengleichen Rotationsbewegung erfolgt. [VDI2157, Vol90]

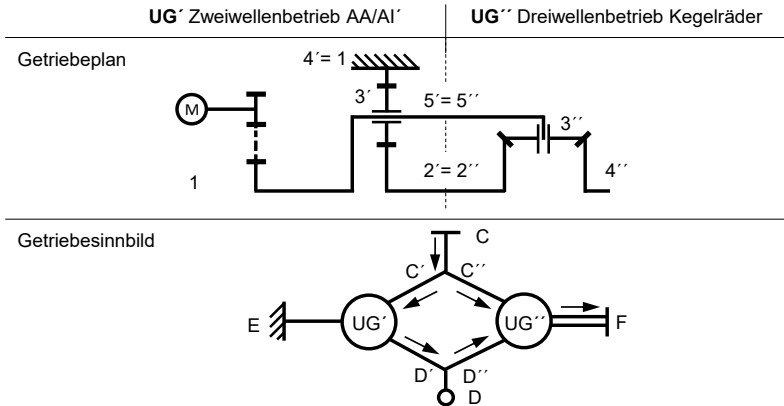


Bild 4.6: Getriebeplan und Getriebeinnbild des Umlaufrädergetriebes

Dazu wird die am Zentralrad 2 durch einfache Übersetzung anliegende Drehzahl, und die am angetriebenen Steg 5 anliegende Drehzahl im **UG''** aufsummiert. Mit der gegebenen Standübersetzung kann über die Drehzahlgleichung das Verhältnis der Drehzahl des Kettfadenrotors  $n_{5'1}$  zur Drehzahl des Schussfadensystems  $n_{4''1}$ , sowie die Drehzahlen der Planeten mathematisch beschrieben werden (s. **Tabelle 4.1**). Von besonderer Bedeutung für die technologiebedingte Verlegebewegung wie auch für die Flechtgeschwindigkeit ist die konstruktive Umsetzung und die Drehzahl des innenverzahnten Zentralrads **4'' / F** (Schussfadensystem).

Tabelle 4.1: Standübersetzung und Drehzahlen

	<b>UG'</b> Zweiwellenbetrieb	<b>UG''</b> Dreiwellenbetrieb
Stand- übersetzung	$i_{2'4'} = -\frac{z_{4'}}{z_{2'}} = -2$	$i_{2''4''} = -1$ (für $z_{4''} = z_{2''}$ )
Drehzahl- gleichung	$n_{2'1} = n_{4'1} * i_{2'4'} + n_{5'1} * (1 - i_{2'4'})$ $n_{5'1} = \frac{1}{3} * n_{2'1}$	$n_{2''1} = n_{4''1} * i_{2''4''} + n_{5''1} * (1 - i_{2''4''})$ $n_{4''1} = -\frac{1}{3} * n_{2''1}$
Drehzahl Planeten	$n_{3'5'} = n_{2'5'} * \frac{z_{2'}}{z_{3'}} = -4 * n_{5'1}$	$n_{3''5''} = -n_{2''5''} * \frac{z_{2''}}{z_{3''}} = -13,7 * n_{5''1}$

Das innenverzahnte Zentralrad 4'' ist in Segmente untergliedert, die jeweils an einem Schlitten befestigt sind. Die Schlitten sind fliegend auf der hydrodynamischen Gleitführung des gegengleich rotierenden Kettfadenrotors gelagert. In den bekannten Hebelflechtmaschinen wird als Führungsform eine geschlossene Flachführung eingesetzt. Eine hydrodynamische Gleitführung, in Verbindung mit der verwendeten Führungsform, zeichnet sich vor allem durch gute Dämpfungseigenschaften und Robustheit, aufgrund des flächigen Gelenkkontaktes mit Umgriff, aus. Als Nachteil ist die offene Führungsform zu nennen, die sich als stark verschmutzungsanfällig erweist und trotz progressiver Minimalmengenschmierung zur Absonderung freier Schmiermittelpartikel neigt. Weitere Nachteile sind die auftretenden Stick-Slip Effekte und starke Erwärmung, vor allem bei unsachgemäßer Schmiermitteldosierung. Durch ein aufwendiges Einschaben jeder einzelnen Führungsfläche und der zusammengesetzten Führungsflächen zueinander kann ein konstanter Schmierfilm ermöglicht werden.

Um eine Aussage über die notwendigen Form- und Lagetoleranzen der Gleitführung zu erhalten wurde, hinsichtlich der Synthese und Entwurfskonstruktion der neuartigen Rotorflechtmaschine „D-3F“, der Grad der Überbestimmungen  $\ddot{u}$  des Gelenkaufbaus analysiert. Vor allem das Überqueren der Schlitzte stellt eine konstruktive Herausforderung dar und führt zu einer kontinuierlich wechselnden Anzahl an Kontaktstellen. Die Anzahl der zu berücksichtigenden Lagetoleranzen ergibt sich über den Grad der Überbestimmungen  $\ddot{u}$  des Gelenkaufbaus:

$$\ddot{u} = 6(k - 1) + f - \sum_{i=1}^k f_i \quad (4.3)$$

durch Einsetzen:

- der Anzahl der Kontaktstellen  $k$ ,
- des Gelenkfreiheitsgrads des Gesamtgelenks  $f$ ,
- der Teilgelenkfreiheitsgrade an der jeweiligen Kontaktstelle  $f_i$ .



Der Gelenkaufbau weist im Zeitpunkt des Überquerens (zwei Teilgelenke) genau acht Kontaktstellen auf und der Grad der Überstimmungen ergibt sich

$$\text{zu:} \quad \ddot{u} = 6(8 - 1) + 1 - 24 = 19 \quad (4.4)$$

Im Zeitfenster davor oder danach (ein Teilgelenk im Zwischenraum) sind im Gesamtgelenk vier Kontaktstellen zusammengefasst und dies führt

$$\text{zu:} \quad \ddot{u} = 6(4 - 1) + 1 - 12 = 7 \quad (4.5)$$

Zur formschlüssigen und schlupffreien Bewegungsübertragung steht jedes Segment mit mindestens einem Planeten  $3''$  im Eingriff. Der Formschluss ist funktionsrelevant, um einen definierten Abstand der Schlitten zueinander (entspricht mindestens der Schlitzbreite von ca. 20 mm) aufrechterhalten zu können. Auf den Schlitten sind die Schussfadenspulenträger befestigt, die mit quasi elliptischen Fadenleitblechen koaxial der Spulenchse ausgestattet sind. Diese Leitbleche dienen der Richtungsvorgabe für die Kettfäden und unterstützen die zerstörungsfreie Fachbildung der Kettfäden. Die Startposition, der in regelmäßigen Abständen geschlitzten Gleitführung auf dem Kettfadenrotor (s. Bild 3.23), muss exakt auf die Startposition der Schlitten abgestimmt werden, um die zeitlichen und geometrischen Restriktionen des Systems „Horn“ zu erfüllen. Grund der gewählten Segmentbauweise mit fliegender Lagerung und geschlitzter Gleitführung des Kettfadenrotors, ist die zerstörungsfreie Relativbewegung des Kettfadens in Abhängigkeit der Rotationsbewegung. Das Öffnen und Schließen des Faches erfolgt in den Zeitfenstern, in denen die Segmente nicht über die Schlitze der Gleitführung geführt werden. Effektiv führt das gewählte Antriebskonzept zur Verdopplung der relativen Drehzahl an den Führungsflächen  $n_{4''5''}$  gegenüber der absoluten Antriebsdrehzahl  $n_{5'1}$ .

Das Teilgetriebe zur Verlegung der Kettfäden ist ein räumliches Nutkurvengetriebe, bestehend aus dem Kettfadenrotor 5, einem ortsfesten und kegelig ausgeführten Nutkurvenring 1, und je einem Fadenhebel 3. Mit der konstanten Antriebsdrehzahl  $n_{FF}$  am Kettfadenrotor (Steg 5) ergibt sich die konstante Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{FF}$  und das am Fadenhebel gelagerte Eingriffsorgan

(Schiffchen) wird entlang der Steuerkurve des Kurvenrings geführt. Durch die resultierende Überlagerung der Antriebsbewegung  $\varphi_{51}$  mit der oszillierenden Abtriebsbewegung am Fadenhebel  $\psi_{31}$ , beschreibt das Fadenführungselement eine räumliche Bahnkurve (Verlegekurve, s. Bild 3.21). Der Kettfaden wird vom jeweils zugeordneten Spulenträger abgezogen und über das Fadenführungselement zur Fachbildung entlang dieser Verlegekurve, und um die Schussfadenspulenträger herum, geführt. Um Anhaltspunkte zur Synthese einer neuartigen Verlegeeinrichtung zu erhalten, wurde das mechanisch-zwangsläufige Getriebe mit Freiheitsgrad 1 zur Erzeugung der konventionellen Verlegebewegung kinematisch analysiert. Aus dem Bewegungszustand, in Verbindung mit den aus der Schussfadenverlegung resultierenden zeitlichen und geometrischen Gegebenheiten, wurden Prozesspunkte ermittelt und für die Synthesaufgabe in einem Bewegungsschaubild (s. Bild 2.5) aufbereitet. Wie bereits in [Den12b] beschrieben, erfolgte die Ermittlung des Bewegungszustands im Antriebskonzept der Hebelflechmaschine analytisch nach den Vorgaben zur Kinematik von starren Maschinen in der Berechnungsumgebung von *Mathcad*® (s. **Anlage 9.4**) und parallel im virtuellen Modell. Im **Bild 4.7** ist das kinematische Schema für die Berechnung und den Aufbau des Modells (s. Bild 4.5) aufbereitet.

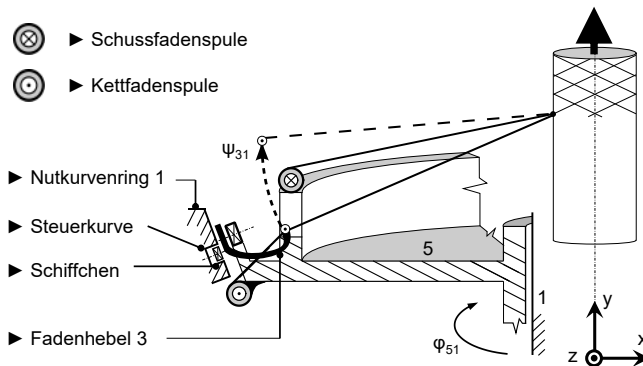


Bild 4.7: Kinematisches Schema der Kettfadenverlegung

Ausgehend vom Kettfadenrotor erfolgte die kinematische Beschreibung der Abtriebsbewegung des Fadenhebels  $\psi_{31}$  mit der einhergehenden Beschreibung des Fadenführungselements. Das analytische Berechnungsmodell sowie das Mehrkörper-Modell wurden parametrisch aufgebaut und über Drehmatrizen und Ortsvektoren, oder entsprechende Gelenkdefinitionen, umgesetzt. Diese parametrisierte Vorgehensweise erlaubte die iterative Konkretisierung der Kettfadenverlegung unter Berücksichtigung der zeitlichen und geometrischen Restriktionen der Schussfadenverlegung. Über die kinematischen Grundabmessungen im Zusammenspiel mit der Abtriebsbewegung  $\psi_{31}$ , die mit Hilfe der Steuerkurve und der darin hinterlegten Bewegungsfunktion mathematisch definiert ist, konnte eine funktionale Bahnkurve ermittelt werden. Eine für die Bindung 2 über 2 geeignete Verlegebewegung ist unter Verwendung des Berechnungswerkzeugs *MOCAD* [Hei10] und der im *ZIM-Projekt 2022605* zur Verfügung gestellten Daten erstellt und im virtuellen Modell auf ihre Funktionalität überprüft worden.

Ursache für die kegelige Ausführung des Nutkurvenrings und der resultierenden Bahnkurve des Fadenführungselements ist die ideale Anordnung der Schussfadenspulenträger im antriebstechnischen Gesamtkonzept unter Berücksichtigung des neutralen Flechtwinkels. Aus dem Zusammenspiel der geometrischen Gegebenheiten resultiert ein näherungsweise idealer Fadenabzugswinkel für den Schussfaden von ca.  $30^\circ$ , der als Auslegungskriterium festgesetzt wird. Diese Vorgabe, in Verbindung mit den technologischen Grundvoraussetzungen der Hohlkugelanordnung, führt zwangsläufig zu einer kegeligen Verlegekurve. Die genannte Grundvoraussetzung besteht darin, dass das Fadenführungselement zur Kettfadenverlegung maximal bis zur Höhe des Flechtrings in Abzugsrichtung und idealerweise möglichst eng um die Schussfadenspulenträger zu führen ist.

Auch die Hebelflechtmaschinen sind aus technologischer Sicht an einer Grenze der Flechtgeschwindigkeit und der Flechtleistung angekommen. Bedingt durch die offene Bauweise der Führungsflächen an der Schussfadenplatte und der verwendeten Verlustschmierung führen steigende Drehzahlen zu einer erhöhten Anzahl an freigesetzten Schmiermittelpartikeln, die zur Verunreinigung des Flechtprodukts und damit zu massiven Einschränkungen in allen weiterführenden Bearbeitungen führen. Die eigentliche Limitierung der technisch machbaren Flechtgeschwindigkeit lässt sich jedoch aus der signifikanten Verlegebewegung der Kettfäden ableiten. Mit steigenden Drehzahlen

schlagen sich Schwingungsanregungen exponentiell in dem auskragenden Fadenhebel nieder, welche vom Fadenhebel ungedämpft auf den Kettfaden übertragen werden. Diese Anregungen führen zu Longitudinalwellen des Kettfadens, ausgehend vom Fadenführungselement des Fadenhebels bis hin zum Flechtring. Je nach Frequenz und Flechtmaterialzusammensetzung ändern sich somit die Wellenlänge und die Amplitude. Kollidiert eine Deformationswelle mit Hindernissen, resultierend aus den zeitlichen und geometrischen Gegebenheiten des Schussfadensystems, führt dies unweigerlich zur Faserschädigung des Flechtfadens bis hin zum Riss.

Gründe für die Schwingungsanregungen liegen einerseits, analog dem Gangbahn-Flügelrad System (s. Kapitel **3.2.1**), im kinematischen Aufbau der offenen Kurvenführung zur Bewegungsübertragung auf den Fadenhebel; andererseits resultieren aus der Relativbewegung erhebliche Längenänderungen der freien Fadenlänge, die alleine durch die mechanisch-passive Tänzerregelung der konventionellen Spulenträger nicht kompensiert werden können. Auch in der Steuerkurve treten Richtungswechsel der Krümmung und der Normalbeschleunigung auf, die wiederum zu Querrucken und Anlagenwechseln des Schiffchens an den Kurvenflanken führen. Bei der visuellen Analyse der Steuerkurve ist von der fundierten Anwendung von Bewegungsdesign auszugehen. Allerdings ist jedes Bewegungsgesetz nur so gut, wie es die technologischen Vorgaben und die gewählte konstruktive Ausführung zulassen. Weiterhin potenzieren sich bei auskragenden Bauteilen schon minimale Schwingungsanregungen in Abhängigkeit der Eigenfrequenz des Bauteils. Von T. Meyer [Mey12] wurde ein Ansatz zur konstruktiven Optimierung dieses Nutkurvengetriebes gezeigt.

## **4.4 Analyse der Verlegetechniken**

### **4.4.1 Vergleich der Flechtgeschwindigkeiten**

Die Flechtgeschwindigkeit und die damit verbundene, tatsächliche Flechtleistung ergeben sich über das Verhältnis der Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung zur Abzugsgeschwindigkeit des entstandenen Flechtprodukts und hängen direkt mit dem Flechtwinkel zusammen. Grundlegend wird die zu erwartende Geschwindigkeit der Flechtfadenverlegung von der Verlegetechnik

und deren getriebetechnischen sowie konstruktiven Umsetzung geprägt. Entscheidend sind dabei die Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwerte der geforderten Verlegebewegung und deren Grad der nichtlinearen Übersetzung. So führen in der Regel entstehende Schwingungsanregungen oder notwendige Kompensationsbewegungen des Fadenlängenausgleichs zu Faserschädigungen und Rissen.

Marktübliche Hebelflechtmaschinen sind in der Regel mit maximal 24 Spulenträgern bestückt und mit Radialflechtmaschinen nicht direkt vergleichbar. Daher wurde ein beispielhafter Vergleich der Flechtgeschwindigkeit und somit der theoretischen Produktivität einer Radialflechtmaschine und einer Hebelflechtmaschine, unter Verwendung der in Kapitel 3.2.6 beschriebenen analytischen Ansätze für den neutralen Flechtwinkel und ohne Berücksichtigung der Flechtadeninteraktionen, durchgeführt. Das Ergebnis ist als qualitative Nachweisführung zu betrachten, da sich über die Anzahl der Flechtäden der notwendige Durchmesser zur Berechnung der Umfangsgeschwindigkeiten verändert. Für offene und ideale, schlauchförmige Geflechte (s. Bild 2.23) mit bekanntem Schlauchradius, kann der in Gleichung (2.1) beschriebene Zusammenhang um die Abzugsgeschwindigkeit  $v_{ab}$  erweitert werden. Die Schlaglänge  $H$  ist ein Produkt aus der Abzugsgeschwindigkeit und dem Zeitintervall  $t_H$ , das zur Ablage genau eines Schlages (Rapport) benötigt wird. Für eine ausführliche Beschreibung der Berechnungsschritte für konventionelle Rundflechtmaschinen sei an dieser Stelle auf Kyosev, „Braiding Technology for Textiles“, Kapitel 14 [Kyo15] und P. Potluri [Pot03], verwiesen.

$$\tan \alpha = \frac{2 * \pi * R}{H} = \frac{2 * \pi * R}{v_{ab} * t_H} \quad (4.6)$$

Gesucht ist die Abzugsgeschwindigkeit  $v_{ab}$ , die aus (4.6) durch Umstellen hervorgeht:

$$v_{ab} = \frac{2 * \pi * R}{\tan \alpha * t_H} \quad (4.7)$$

Das zu ermittelnde Zeitintervall  $t_H$  zur Ablage genau eines Schlages lässt sich aus der Anzahl der Flügelräder  $N_{FR}$  - für 16 Spulen und einer Bindung 2 über

2 ergeben sich genau acht Flügelräder – und der an einem Flügelrad anliegenden Drehzahl  $n_{FR}$  ermitteln. Ein Klöppel durchläuft für einen Schlag eine komplette Umdrehung; d.h. eine Gangbahn, die sich aus acht halbkreisförmigen Elementen zusammensetzt. Das Zeitintervall  $t_H$  entspricht der Zeit, die zum Passieren der Gangbahn mit der gegebenen Drehzahl  $n_{FR}$  notwendig ist:

$$t_H = \frac{N_{FR} * 60}{2 * n_{FR}} \quad (4.8)$$

Einsetzen von (4.8) in (4.7) mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{FR}$  aus Drehzahl  $n_{FR}$  führt zu:

$$v_{ab} = \frac{2 * \pi * R * 2 * n_{FR}}{\tan \alpha * N_{FR} * 60} = \frac{2 * R * \omega_{FR}}{\tan \alpha * N_{FR}} \quad (4.9)$$

Mit der Winkelgeschwindigkeit eines Flechtfadens  $\omega_{FF}$ :

$$\omega_{FF} = \frac{2 * \omega_{FR}}{N_{FR}} \quad (4.10)$$

Die Gleichung (4.11) wird direkt zur Ermittlung der Abzugsgeschwindigkeit des Hebelflechters herangezogen, da in diesem Fall die gegebene Antriebsdrehzahl am Rotor den Umdrehungen eines Spulenträgers entspricht. Demnach ergibt sich die Abzugsgeschwindigkeit  $v_{ab}$ :

$$v_{ab} = \frac{R * \omega_{FF}}{\tan \alpha} \quad (4.11)$$

Das folgende Rechenbeispiel (s. **Tabelle 4.2**) wurde für den gegebenen Flechtwinkel und einen Schlauchradius von 10 mm bei einer Bestückung mit 16 Spulen und einer Bindung 2 über 2, kalkuliert. Als Antriebsdrehzahl wurden 150 U/min am Flügelrad einer Radialflechtmaschine (Maximum laut Herstel-

lerangaben) herangezogen und mit 150 U/min am Rotor einer Rotorflechtmaschine verglichen. Für das gegebene Beispiel ist die Abzugsgeschwindigkeit der Hebelflechtmaschine viermal so groß wie die des Radialflechters. Dieser Faktor resultiert aus der Anzahl an Flügelrädern und verkleinert sich dementsprechend mit steigender Anzahl der Fadensysteme.

Tabelle 4.2: Vergleich der Flechtgeschwindigkeiten

<i>System „Horn“</i>	<i>Gangbahn-Flügelrad System</i>
$v_{ab} = \frac{R * \omega_{FF}}{\tan \alpha}$	$v_{ab} = \frac{2 * R * \omega_{FR}}{\tan \alpha * N_{FR}}$
$v_{ab} = \frac{10mm * \omega_{FF}}{\tan 54,44^\circ}$ $= 93,716 \frac{mm}{s}$	$v_{ab} = \frac{2 * 10mm * \omega_{FR}}{\tan 54,44^\circ * 8}$ $= 23,429 \frac{mm}{s}$

4.4.2 Vergleich der Spulenordnung

Es besteht ein unmittelbarer Zusammenhang bezüglich der Spulenordnung hinsichtlich der Maschinenhauptachse, der Verlegetechnik zur Handhabung des Flechtmaterials und dem Abzugsverhalten von der Spule. Eine direkte Vergleichbarkeit der zu betrachtenden Flechtsysteme liegt erst mit der Befähigung des Rotorflechtmaschinen Systems zur Realisierung der gestellten Aufgabe vor. Im daher als qualitativ und subjektiv zu bewertenden Vergleich der zum Überflechten geeigneten Systeme werden zwei signifikante Unterschiede ersichtlich. Hebelflechtmaschinen zeichnen sich durch die ausrichtungskonstante Spulenordnung, tangential zur Maschinenhauptachse, aus. Im Gegensatz dazu führt der Aufbau der Radialflechtmaschinen zu einer radialen Anordnung der Spulenachsen hinsichtlich der Maschinenhauptachse mit nicht ausrichtungskonstanter Spulenordnung (vgl. Bild 4.8).

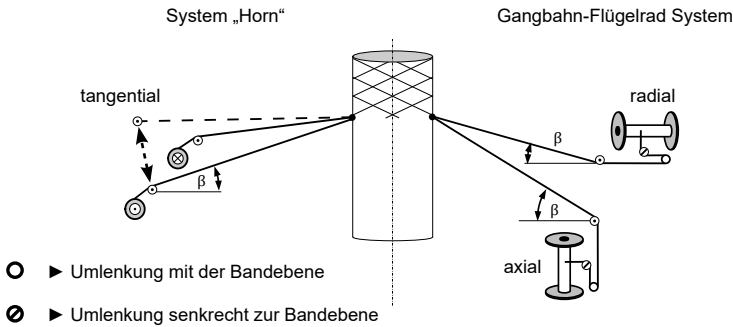


Bild 4.8: Vergleich der Spulenanordnung

Besonders für die Preformherstellung durch Überflechten mit Rund- oder Radialflechtmaschinen erweist sich die eigens entwickelte radiale Bauform und die damit verbundene Klöppelanordnung als vorteilhaft gegenüber der axialen Klöppelanordnung. Der Flechtprozess, und somit der Vorgang des Zusammenziehens, beginnt mit dem Passieren des Fadenabzugspunkts und setzt sich über den Flechtring bis zur Ablage auf dem Flechtkern fort. Sowohl am Fadenführungselement des Abzugspunkts als auch am Flechtring findet ein Umlenken der Flechtmaterialien statt. Der für die Umschlingung an genannten Elementen entscheidende Fadenabzugswinkel ist, bei der im Bild 4.8 gezeigten Spulenanordnung, radial zur Maschinenhauptachse deutlich kleiner als bei der axialen Ausrichtung. Weitere Vorteile der Radialflechtmaschine liegen in der geringen Bautiefe der Flechtvorrichtung und der theoretischen Zentrierung des Flechtpunkts im ringförmigen Flechtbett. Diese Zentrierung führt zum größtmöglichen Bewegungsfreiraum für die Orientierung des Flechtkerns in der Flechtebene. Mit der Abzugsorientierung und der daraus resultierenden geometrischen Lage des Fadenabzugspunkts hinsichtlich der Maschinenhauptachse, ist theoretisch eine bidirektionale oder multiaxiale Abzugsbewegung ohne Flechtringe möglich. Einen weiteren Vorteil beschreibt unter anderem Birkefeld [Bir13] mit der entstehenden Verlegebewegung der Flechtfäden entlang einer Zylinderoberfläche (Ring). Demnach wird der Einfluss der Fadenlängenänderung aufgrund der Verlegebewegung in dieser Anordnung gegenüber der axialen deutlich reduziert.



Ein weiterer Faktor ist das Abzugsverhalten von der Spule, welches schon beim Umspulvorgang (s. Kapitel 3.2.4) entscheidend geprägt wird. Durch den variablen Fadenverbrauch und der einhergehenden Kompensationsbewegung kommt es an den Fadenführungselementen zu Relativbewegungen bis hin zum kurzzeitigen Stillstand. Der Wechsel von Haft- zu Gleitreibung ruft wechselnde Reibkräfte hervor, die in Verbindung mit dem Aufbau und der Ausrichtung der Fadenführungselemente zu Schädigungen des Flechtmaterials führen. Diese Schädigungen setzen sich vor allem beim Zusammenziehen des Geflechts im Flechtpunkt fort. Durch das Zusammenziehen entstehen wiederum Reibstellen der gegenläufigen Flechtfäden untereinander in meist schräger Orientierung zur Faser. Nach Kuntz [Kun04] werden vor allem bereits geschädigte Flechtfäden durch den Vorgang des Zusammenziehens weiter geschädigt, wohingegen unversehrte Flechtfäden in der Regel unversehrt bleiben. Diese Tatsache führt im Extremfall zu einer Flusenbildung am Flechtprodukt. Auch die Umlenkrichtung spielt vor allem bei bandförmigen Flechtmaterialien eine entscheidende Rolle.

Der Flechtprozess in Hebelflechtmaschinen ähnelt dem Rundweben, wie schon sinnfällig aus der Bezeichnung Schuss- und Kettfadensystem abgelesen werden kann. Im Gegensatz zum Rundweben führt die gegengleiche Rotationsbewegung der Flechtfadensysteme, tangential auf einem Breitengrad um die Maschinenhauptachse, zu den typischen Flechtcharakteristika. Diese Verlegetechnik, in Verbindung mit der ausrichtungskonstanten Spulenanordnung, bedingt die lageparallele Verlegung des Flechtmaterials und die daraus resultierende hervorragende Qualität des Geflechts. Die isolierte Betrachtung der Verlegung eines Flechtfadensystems ähnelt, aufgrund der Spulenausrichtung (s. Bild 4.8) und der gegengleichen Rotationsbewegung beider Flechtfadensysteme, dem lageparallelen Umwickeln eines Kerns. Das direkte Umwickeln mit tangentialem Abzug von den Flechtspulen führt zu der theoretisch geringstmöglichen Anzahl an Umlenkstellen im Gesamtprozess und vermeidet potentielle Faserschädigungen. Aufgrund der Hohlkugelanordnung und der rotierenden Antriebsbewegung sind der variable Fadenverbrauch und die einhergehende Kompensationsbewegung vergleichsweise gering. Vor allem der Schussfaden zeichnet sich durch ein quasi ideales Abzugsverhalten, mit einem geringen Anteil an Relativbewegungen der Flechtfäden an den Fadenführungselementen, aus.

Im Gegensatz zu Radialflechtmaschinen ist der Flechtring ein existenzieller Bestandteil des Flechtprozesses in der Hebelflechtmaschine. Analog der im Bild 4.9 folgenden Erläuterungen zur Vektorzerlegung, ist auch die oszillierende Relativbewegung der Kettfäden in ihre radialen und axialen Komponenten zerlegbar. Aufgrund der speziellen Verlegebewegung überwiegt der Bewegungsanteil, der koaxial zur Maschinenhauptachse gerichtet ist, und somit auch koaxial zur Abzugsbewegung wirkt. Dadurch erfolgen partielle und gegenläufige Überlagerungen der Kettfadenverlegebewegung und der Abzugsbewegung mit einhergehenden Schwankungen der Fadenabzugs- und Fadeneinlaufwinkel. Die daraus folgenden und gleichermaßen oszillierenden Verschiebungen des Flechtpunkts führen ohne einen Flechtring zu unerwünschten Verformungseffekten und einer Verminderung der Produktqualität. In dieser Hinsicht sind die Flechtsysteme der Radialflechtmaschine und Rotorflechtmaschine neben der Hohlkugelanordnung auch in der Verlegebewegung nur bedingt vergleichbar.

Vor allem in sicherheitsrelevanten Schlauch- oder Kabelanwendungen sind oftmals spezielle Ansprüche an die Homogenität und Parallelität des Geflechts gefordert. Ähnliche Anforderungen bestehen auch bei der Verarbeitung von Verstärkungsmaterialien (Multifilament). Durch die lageparallele Verlegung ist davon auszugehen, dass Richtungswechsel der angreifenden Kraftkomponenten an den Kontaktstellen der Flechtfadensysteme, beim Zusammenziehen untereinander, vermieden oder reduziert werden können. Im Gegensatz zur axialen oder radialen Anordnung der bisher eingesetzten Verfahren wird die Verdrehung der Flechtfäden, aufgrund der zyklischen Richtungswechsel während der Verlegebewegung der Spulenträger, vermieden. Das Abzugsverhalten prägt sich hier deutlich gleichmäßiger und fadenschonender aus. Durch die tangential Anordnung der Spulen ist zwischen dem tangentialen Abzug von der Spule und dem Fadenabzugspunkt theoretisch keine Umlenkung senkrecht gegen die Bandebene des Rovings notwendig. Weitere Betrachtungen zur Eignung der Kohlenstofffaserverarbeitung unter den genannten tribologischen Effekten sind im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich und müssen im Versuch erprobt werden. Allein diese systembedingte Anordnung der Spulen führt zu dem Schluss, dass bei einer entsprechenden konstruktiven Ausführung der Spulenträger eine Umlenkung senkrecht gegen die Bandebene entfällt.

#### 4.4.3 Kinematische Prozessbeschreibung

Die qualitative Analyse der Verlegetechnik einer Radialflechtmaschine erfolgt mit Hilfe einer kinematischen Prozessbeschreibung zur Abbildung der Flechtfadenpfade auf einem zylindrischen und entlang der Maschinenhauptachse geführten Flechtkern. Ziel dabei ist die Visualisierung der Überlagerung des wechselförmigen Bewegungsverlaufs, resultierend aus dem Gangbahn-Flügelrad System, entlang der Flechtfadenablage auf dem Flechtkern. Aus der getriebetechnischen und konstruktiven Umsetzung des Gangbahn-Flügelrad Systems geht eine Überlagerung der Verlegebewegung in Form der Gangbahn hervor. Demnach ist die Verbindung des Klöppelfußes mit dem Fadenabzugspunkt als starre Verbindung zu betrachten. Der Fadenabzugspunkt wird tangential entlang der Bahnkurve geführt. Wie schon im Bild 3.12 gezeigt, entsteht aus diesem wechselförmigen Bewegungsverlauf ein inkonstanter Abstand vom Fadenabzugspunkt bis zum Flechtpunkt. Die schwankende Fadenlänge und die einhergehenden Unterschiede der Fadenabzugsspannung werden mit Hilfe des Ausgleichsmechanismus im Klöppel kompensiert. Über die Klöppelanordnung im Radialflechter können die durch die Relativbewegung auftretenden Faserschädigungen minimiert werden.

Ein weiterer Effekt, der speziell beim Überflechten die reibungsbehafteten Gleiteffekte der Flechtfäden untereinander und die Reibung der Flechtfäden beim Zusammenziehen auf dem Flechtkern betrifft, resultiert direkt aus dem wechselförmigen Bewegungsverlauf. Wie in „Braiding Technology for Textiles“, Kapitel 8, von Kyosev [Kyo15] dargestellt, ändert sich der Fadenabzugswinkel  $\beta$  und der Fadeneinlaufwinkel  $\alpha'$  (vgl. Bild 3.12 und Bild 3.18) je nach Position des Klöppels und damit des Fadenabzugspunkts zur Maschinenhauptachse und damit zum Flechtpunkt. Bei bekanntem Radius der halbkreisförmigen Elemente der Gangbahn  $r_{FR}$  (Rollenmittelpunktsbahn) ergibt sich der Bereich des Fadenabzugswinkels  $\beta$  zu:

$$\tan \beta_{1,2} = \frac{s \pm r_{FR}}{h} \quad (4.12)$$

Über den bekannten Fadenabzugswinkel und unter Vernachlässigung des Flechkernradius kann die gegebene und als konstant angenommene Fadenabzugskraft  $\mathbf{F}_{FA}$  vektoriell in zwei Komponenten bezüglich der Maschinenhauptachse zerlegt werden (s. **Bild 4.9**). Die Kraftkomponente, die radial zur Maschinenhauptachse  $\mathbf{F}_{FAr}$  steht, verursacht eine Verdrillung der gegenläufigen Flechtfäden und ein Axialmoment am Flechkern. Durch die spezifische Verlegebewegung entlang der Gangbahn, wechseln mit jeder Umdrehung eines Flügelrads die Position des Klöppels und somit auch die angreifende Kraft  $\mathbf{F}_{FAr}$  vom einen Flechtfadensystem zum anderen. Ist eine Rund- oder Radialflechtmaschine zum Beispiel nur für eine Bindung 1 über 1 bestückt, ändert sich bei jeder 180°-Drehung des Flügelrads die Reibung jedes Fadens. Damit wechselt auch die Richtung des angreifenden Axialmoments am Flechkern. Dieser Wechsel führt, rein optisch, zu einer radial-oszillierenden Bewegung im Flechtpunkt. Die Kraftkomponente, die axial zur Maschinenhauptachse  $\mathbf{F}_{FAa}$  steht, verursacht eine axial-oszillierende Bewegung entlang der Abzugsrichtung. Die genannten Kraftkomponenten müssen unmittelbar bei der Dimensionierung des Abzugs berücksichtigt werden.

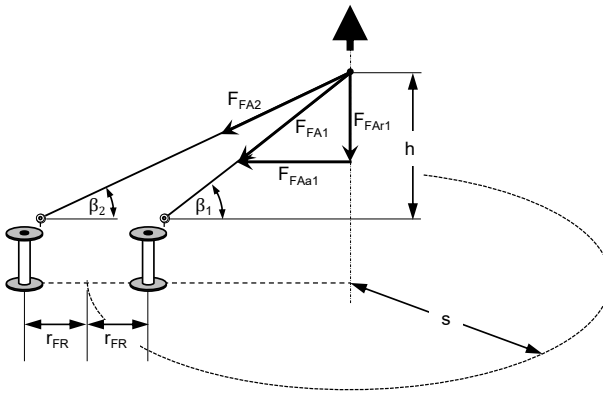


Bild 4.9: Vektorzerlegung der Fadenabzugskraft

Des Weiteren spiegelt sich der wechselförmige Bewegungsverlauf in den Flechtfadenpfaden wider. Im idealen Flechtprozess ergeben sich daraus Überlagerungen entlang dem abgewickelten Flechtfaden in Form der Gang-

bahn. Bereits Rosenbaum [Roe91] beschreibt die Überlagerungen in Verbindung mit den reibungsbehafteten Gleiteffekten beim Zusammenziehen der gegenläufigen Flechtfäden, die zu Abweichungen gegenüber dem idealen Ablageverhalten der Flechtfäden auf dem Kern führen. Bei der Ablage auf formgebenden Flechtkernen, entsprechender Verteilung der genannten wechselnden Kraftkomponenten und der zusätzlichen Reibung zwischen den Flechtfäden und dem Kern selbst, ergeben sich in Summe ungewünschte Querkrümmungen und resultierende Umlenkungen der Flechtfäden. Derartige Querkrümmungen und resultierende Umlenkungen im Flechtmaterial äußern sich beispielsweise im sogenannten S-Schlag. Je mehr Stehfäden ( $0^\circ$ -Fäden) und Flechtfäden eingezogen sind, desto größer ist die Reibung der Fäden untereinander.

Die Abbildung der Flechtfadenpfade erfolgte auf Basis des in Kapitel 4.2 beschriebenen virtuellen Modells zur kinematischen Abbildung der Klöppelbewegungen und in Anlehnung an die in Kapitel 3.2.6 gezeigten Varianten zur kinematischen Prozesssimulation von Rawal et al. [Raw05, Raw07] und Akkerman et al. [Akk06]. Die genannten Veröffentlichungen zeigen numerische Ansätze zur Beschreibung der Garnpfade und deren Ablage auf dem Flechtkern im Gangbahn-Flügelrad System. Diese Ansätze sind als ideengebend für die Abbildung des Flechtprozesses mit Stabelementen als Fadenrepräsentanten und Gelenkdefinitionen an Umlenkstellen zu betrachten. Mit der kinematischen Abbildung der Klöppelbewegung sind die Fadenabzugspunkte der Klöppel in zeitabhängiger Parameterdarstellung für eine konstante Antriebsdrehzahl an den Flügelrädern gegeben. Zur Abbildung des Flechtprozesses wurde der Abzug in Gestalt eines zylindrischen Flechtkerns zur Ablage der Flechtfäden, und die Flechtfäden selbst, im virtuellen Modell definiert (s. **Bild 4.10**). Für einen zylindrischen und entlang der Maschinenhauptachse geführten Flechtkern konnte für einen gewünschten Flechtwinkel bei vorgegebenem Zylinderradius die Abzugsgeschwindigkeit über die Gleichung (4.13) kalkuliert werden. Der Flechtkern wurde entsprechend den Vorgaben als zylindrische Regelgeometrie modelliert, und mit einer Gelenkdefinition entlang der Maschinenhauptachse durch den zentralen Flechtring mit der ermittelten Abzugsgeschwindigkeit geführt.

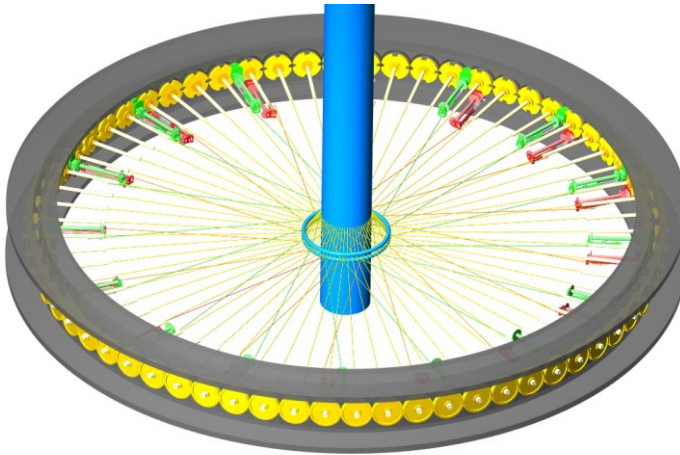


Bild 4.10: Virtuelles Modell eines Radialflechters

Der gelenkige Einbau der Flechtfäden orientierte sich an den grundlegenden geometrischen und kinematischen Bedingungen, die bei der Verlegung und Ablage der Fäden im idealen und stetigen Flechtprozess, ohne Reib- und Gleiteffekte, berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen Tangentialbedingungen sowohl beim Ein- und Auslaufen an den Umlenkelementen als auch bei der Ablage auf dem Kern. Weiterhin mussten die resultierende Krümmung bei der Umlenkung am Flechtring und die variable Fadenlänge im Verlauf der Verlegebewegung für eine realitätsnahe und funktionale Prozesssimulation abgebildet werden. Grundsätzlich wurde jeder Flechtfaden aus drei Stabelementen zusammengesetzt, um diese Fadenlängenänderung aufgrund der Verlegebewegung zu berücksichtigen. Die genannten Stabelemente wurden mittels Gelenkdefinitionen vom Fadenabzugspunkt über den Flechtring hin zum Flechtpunkt eingebaut und mit Parallelitätsbedingungen versehen, um die Überlagerung des wechselförmigen Bewegungsverlaufs im Modell abbilden zu können. Durch die Kinematik der Fadenabzugspunkte und des Flechkerns konnte der Flechtfadenpfad als Raumkurve auf dem Flechkern visualisiert werden, **Bild 4.11** (oben). Durch die geschickte Gelenkdefinition am Fadenabzugspunkt des Klöppels konnte sowohl die Modellfunktionalität sichergestellt als auch die Fadenlängenänderung im Flechtprozess als Messgröße

abgetragen werden. Analog der in Kapitel 5.2.3 gezeigten Variante zur mathematischen Beschreibung der Fadenlängenänderung, kann diese Messgröße zur Kalkulation des Fadenbedarfs herangezogen werden. Das gezeigte Diagramm des Fadenbedarfs (s. **Bild 4.11** unten) ist unter den bereits benannten Modelleinschränkungen als qualitatives Anschauungsmaterial und Nachweisführung der Bewegungsüberlagerung zur bewerten. Die variable Fadenlänge, resultierend aus den Umlenkungen der Flechtfäden an den Kreuzungsstellen, wurde demnach im Modellaufbau sowie in der Darstellung der Messgröße nicht berücksichtigt. Vor allem für die tatsächliche Auslegung und konstruktive Umsetzung und den Betrieb jeder Flechtmaschine ist die frühzeitige Berücksichtigung der variablen Fadenlänge bzw. des Fadenbedarfs ein entscheidender Faktor (vgl. Kapitel 3.2.4).

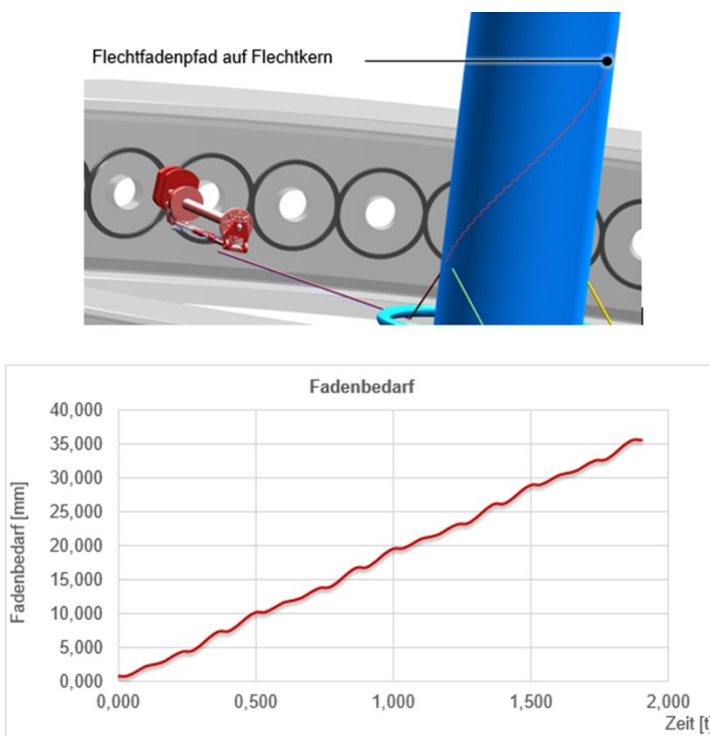


Bild 4.11: Flechtfadenpfad eines Flechtfadens (oben), Fadenbedarf (unten)

## 4.5 Neukombination der Teilfunktionen und Teilfunktionsträger

Das AiF-geförderte ZIM-Kooperationsprojekt 2022605 „*Entwicklung einer neuartigen Fadenverlegeeinrichtung für Schnellflechtmaschinen*“ der Firma **Kabelflechter Alfeld** muss im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zur Potentialerschließung als ideengebend berücksichtigt werden. Ziel des Kooperationsprojekts war eine Steigerung der Flechtleistung um bis zu 50 Prozent gegenüber allen konventionellen Schnellflechtmaschinen und die drastische Reduktion von Schmiermittelkontaminationen des Flechtprodukts. Vor allem die Schmiermittelreduktion wurde bereits zielführend in Richtung der potentiellen Verarbeitung von Hochleistungs-/ Verstärkungsfasern projektiert. Das Mittel der Wahl war die partielle Optimierung der technisch und technologisch limitierenden Teilfunktionsträger im neuartigen Rotor-/ Schnellflechtmaschinen System „Kabelflechter“. Die wesentlichen Aufgaben des Kooperationsprojekts bestanden demnach zum einen in der Synthese und Integration eines neuartigen Mechanismus zur kinematisch optimalen Verlegung der Kettfäden als Ersatz des Fadenhebels; zum anderen im Austausch der bewährten Gleitführung durch eine wälzgelagerte Rollenbahnführung zur Reduktion der freigesetzten Schmiermittelpartikel.

Für die Entwicklung von leistungsgesteigerten Textilmaschinen oder von Textilmaschinen für neue technologische Anforderungen bietet sich die Herangehensweise der partiellen Optimierung im ersten Schritt an. Damit können, wie im vorliegenden Fall, bestehende Grundprinzipien und technologische Randbedingungen weitestgehend beibehalten und Entwicklungsrisiken minimiert werden. Demnach gestaltet sich der gleichwertige Ersatz von Teilfunktionsträgern weniger Aufwendig als eine komplette Neuentwicklung. Auch die im Kooperationsprojekt gewählten Lösungsansätze zur Optimierung von Teilfunktionsträgern konnten ihre prinzipielle Funktionalität in separaten Prüfständen nachweisen. Die deutlichen konstruktiven Schwachstellen (vgl. Kapitel 5) im entstandenen Prototyp, auf Basis des konventionellen Aufbaus (vgl. Kapitel 4.3), führten jedoch letztendlich zu der Nichterfüllung der gewünschten Flechtleistung. Neben den leistungsminimierenden Schwachstellen zeigten sich konzeptbedingte Einschränkungen mit entscheidender Bedeutung für die technologischen Anforderungen an das Überflechten von formgebenden Ker-



nen zur Preformherstellung. Vor allem die Realisierung einer großen Durchgangsöffnung in einer ringförmigen Flechtvorrichtung ist mit dem vorliegenden Ansatz des gekoppelten Umlaufrädergetriebes nicht zielführend und kann alleine durch die partielle Optimierung nicht gelöst werden. Die bekannten Möglichkeiten zur Integration von Stehfäden für die Erzeugung der konventionellen triaxialen Flechtstruktur sind ebenfalls ungeeignet.

Diese genannten Schwachstellen und die konzeptbedingten Einschränkungen des Systems „Kabelflechter“ zeigten jedoch die Notwendigkeit einer kombinierten Vorgehensweise zur Gestaltung und Synthese der Flechtfadenverlegung sowie deren Antriebstechnik. In logischer Konsequenz wurde dafür eine neue Methodik zur prozessorientierten Synthese, auf Basis der Technologiesynthese, erarbeitet und in den ganzheitlichen Ansatz der Getriebesynthese integriert. Ausgangspunkt der Technologiesynthese war die grundlegende Studie und Bedarfsanalyse der textilen Prozesskette zur Herstellung von FV-Bauteilen mit reproduzierbarer und kraftflussgerechter Orientierung der Verstärkungsfasern in den eingesetzten textilen Halbzeugen. Weitere Anhaltspunkte lieferte die freie Betrachtung aller Voraussetzungen zur wirtschaftlichen Serienfertigung von belastungsgerechten Preforms durch das schichtweise Überflechten formgebender Kerne. Mit der qualitativen und kinematischen Analyse der zum Überflechten geeigneten Flechtsysteme konnten wichtige antriebstechnische sowie konstruktive Parameter isoliert werden. Diese Herangehensweise ging mit dem Auflösen der kinematischen, strukturellen und konstruktiven Vorgaben der bekannten Flechtsysteme und der zielgerichteten Neukombination von erforderlichen Teilfunktionen zur Herstellung der bestmöglichen und zweckoptimalen Bindungsstruktur einher. Dabei galt es die gewonnenen Erfahrungen und die geeigneten Ergebnisse des Kooperationsprojekts im Syntheseprozess zweckoptimal zu integrieren. Die Technologiesynthese führte letztlich zum neuen Antriebskonzept für die Rotorflechtmaschine „**D-3F**“ und dem einhergehenden textiltechnologischen Fertigungsverfahren mit einer neuen gewebeartigen Bindungsstruktur als Kombination aus Gelege und Geflecht bzw. Gewebe: „**D-3FG**“.

Wie unter anderem von M. Milwich [Mil14] oder J. Schäfer [Scf14] beschrieben, existieren bereits Fertigungsverfahren zur Herstellung von strangförmigen Profilen ohne Veränderung des Querschnitts mit einer Kombination aus Gelege und Geflecht. Aufgrund der fehlenden Querverbindungen vom Geflecht zum Gelege erhöht sich beim Umflechten formgebender Kerne die

Wahrscheinlichkeit von Faltenbildung oder Verrutschen der Verstärkungsfasern. Eine reproduzierbare und kraftflussgerechte Orientierung der Verstärkungsfasern ist demnach nur schwer umsetzbar. Die neue gewebeartige Bindungsstruktur bietet daher in logischer Anwendung des prozessorientierten Syntheseverfahrens eine mechanisch-zwangläufige Antriebslösung für die Gestaltung eines Fertigungsprozess zur Herstellung von belastungsgerechten Preforms. In der folgenden **Tabelle 4.3** sind alle wesentlichen Teilfunktionen und Teilfunktionsträger der Neukombination strukturiert aufgelistet.

Tabelle 4.3: Neukombination der Teilfunktionen und Teilfunktionsträger

<b>Gangbahn- Flügelrad System</b>	<b>System „Horn“</b>	<b>System „Kabelflechter“</b>
Fertigungstechnologische Parameter und Prozessbeschreibung, Werkstoffkombinationen, Fadenführungselemente etc.		
Fertigungsprozess und periphere Anlagentechnik zur Handhabung der Flechtkerne		
Formschlüssige und schlupffrei Bewegungsübertragung zur Erzeugung der Verlegebewegung (mechanisch-zwangläufig)		
Ringförmiger Aufbau mit großer Durchgangsöffnung	Hohlkugelanordnung	
	ausrichtungskonstante Spulenanordnung, tangential zur Maschinenhauptachse (lageparallelen Verlegung der Flechtfäden)	
	Aufbau der Spulenträger	
		wälzgelagerte Rollenbahnführung des Schussfadensystems
mechanisch-passive Kompensationseinrichtung zum Fadenlängenausgleich der Schussfäden an den Schussfadenspulenträger		
		geführtes Fadenstellglied zur mechanisch-zwangläufigen Verlegung der Kettfäden
		aktive Kompensationseinrichtung zum Fadenlängenausgleich der Kettfäden

## 5 Partielle Optimierung einer konventionellen Hebelflechtmaschine

### 5.1 Technologische Vorgaben zur Leistungssteigerung

Bei heute auf dem Markt erhältlichen Hebelflechtmaschinen ist, aus technischer Sicht, eine Grenze der Flechtgeschwindigkeit erreicht. Neben den bereits in Kapitel 4.3 benannten Verunreinigungen des Flechtprodukts und den Schwingungsanregungen der Flechtfäden, liegt ein weiterer Schwachpunkt in der absperrenden Form des Nutkurvenrings. Die Zugänglichkeit der Spulenträger und der Fadenhebel wird durch den massiven Kurvenring stark eingeschränkt. Dadurch gestalten sich der Spulenwechsel, das Einrichten der Maschine und Reparaturarbeiten als sehr zeitaufwendig und sind nur von erfahrenem Personal realisierbar.

Die Schwerpunkte und Zielstellungen der partiellen Optimierung stellten sich wie folgt dar:

- Synthese eines neuartigen, mechanisch-zwangläufigen Antriebskonzepts zur faserschonenden und lageparallelen Verlegung der Kettfäden entlang der technologiebedingten Verlegekurve
- Integration der Verlegeeinrichtungen in ein platzsparendes und zugängliches Gesamtkonzept, ohne einen massiven Nutkurvenring, unter Berücksichtigung der Leistungssteigerung und geringem Schmiermittelbedarf
- Optimale Auslegung des Antriebskonzepts zur Vermeidung von Schwingungsanregungen des Kettfadens und der Steigerung der Qualität des Flechtprodukts
- Steigerung der Flechtleistung durch das Erhöhen der Antriebsdrehzahl  $n_{FF}$  am Kettfadenrotor auf bis zu  $350 \text{ [} \frac{1}{\text{min}} \text{]}$  und der resultierenden Verlegefrequenz von  $23 \frac{1}{3} \text{ [} \frac{1}{\text{s}} \text{]}$  zu ermöglichen

- Verwendbarkeit marktüblicher Spulenträger für die marktüblichen Flechtspulen FSP 80/100/80 oder FSP 98/100/80 [Sti15]
- Verarbeitung aller flechtüblichen Materialien bei einer maximalen und möglichst konstanten Fadenabzugsspannung von 15 [N]

Die entscheidende Voraussetzung zur Entwicklung der neuartigen Fadenverlegeeinrichtung war die mathematische Beschreibung der Kettfadenverlegebewegung in Form einer Führungs-/Bewegungsaufgabe. Eine kinematisch optimale Verlegung der Kettfäden entlang der Verlegekurve, zeichnet sich vor allem durch die kollisions- und zerstörungsfreie Fachbildung aus. Dabei sind die Verletechnik des Systems „Horn“ für eine gewählte Bindung, die zeitlichen und geometrischen Gegebenheiten des Schussfadensystems und die ideale Anordnung der Schussfadenspulenträger im antriebstechnischen Gesamtkonzept, unter Berücksichtigung des neutralen Flechtwinkels, zu beachten. Diese Vorgaben, in Verbindung mit der Hohlkugelanordnung, führten auch im neuartigen System zwangsläufig zu einer kegeligen Verlegekurve.

Ausgangspunkt der partiellen Optimierung war die in Kapitel 4.3 analysierte Hebelflechtmaschine BMV16. Zur Definition von Prozesspunkten und gestalterischen Freiräumen für die Entwicklung der optimalen Verlegekurve der Bindung 2 über 2 und zur kinematischen Verifikation der neuen Verlegeeinrichtung, wurde ein Verlegezyklus der konventionellen Verlegekurve (s. **Bild 5.1**) herangezogen. Die spezielle Verlegebewegung jeder Verlegeeinrichtung des Systems „Horn“ setzt sich für eine 16-spulige Flechtmaschine, bei der Bindung 2 über 2, aus vier Verlegezyklen pro Umdrehung des Kettfadenrotors zusammen. Aufgrund der konzeptbedingten Überlagerung der rotierenden Grundbewegung des Kettfadensystems mit der oszillierenden Relativbewegung zur Fachbildung, wurde eine zylindrische Abwicklung und die Isolation eines Verlegezyklus (s. Bild 5.1) zur vereinfachten mathematischen Darstellung und Bearbeitung durchgeführt.

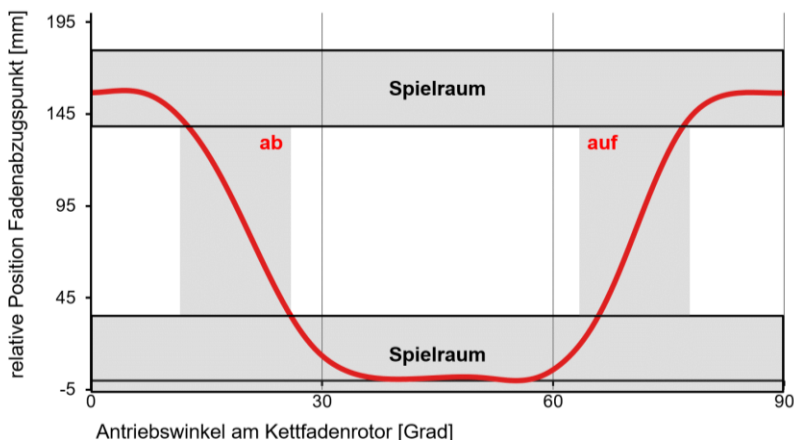


Bild 5.1: Positionsanalyse des Fadenabzugspunktes zylindrisch abgewickelt

Das neue Antriebskonzept für Schnelflechtmaschinen basiert auch in der neuen Funktionseinheit auf einem gekoppeltem Umlaufrädergetriebe zum mechanisch-zwangläufigen Antrieb beider Fadensysteme mit einer gegen-gleichen Rotationsbewegung. Grundlegend handelt es sich dabei, analog der analysierten Hebelflechtmaschine, um die Kombination eines Umlaufräderübersetzungsgetriebes **UG'** im Zweiwellenbetrieb mit einem Umlaufrädergetriebe **UG''**. Im Gegensatz zum bewährten Kegelrad-Umlaufgetriebe kommt bei dem neu entwickelten Getriebe in der zweiten Stufe der geradzahnte Aufbau AA/Al zum Einsatz. Die Segmentbauweise zur formschlüssigen und schlupffreien Bewegungsübertragung, mit Hilfe von Planeten, bleibt erhalten. Diese Planeten stehen über eine Stirnradpaarung im Kontakt mit den Segmenten und werden von einem zentralen Sonnenrad angetrieben.

Als Lösungsansatz, um das Potenzieren von Schwingungsanregungen aufgrund ausragender Getriebeelemente zu vermeiden und die projektierte Leistungssteigerung zu erreichen, wurde ein geführtes Fadenstellglied mit einem aktiv angetriebenen Fadenlängenausgleich zur verschleißarmen Handhabung der Kettfäden gewählt. Auch der Antrieb und insbesondere die konstruktive Umsetzung der Gleitführung zur Schussfadenverlegung waren hinsichtlich des Schmiermittelbedarfs und der resultierenden Verunreinigungen

des Flechtproduktes neu auszulegen. Um die übliche Lebensdauer einer Produktionseinrichtung bei der projektierten Drehzahl gewährleisten zu können, wurde die bewährte Gleitführung durch eine wälzgelagerte Rollenbahnführung gleichwertig ersetzt. Das im Rahmen des Forschungsprojekts entstandene Lösungskonzept ist im DE-Patent 102010026470 [Emm12] „*Kreisförmige Schlittenbahnführung für eine Flechtmaschine*“ von W. Emmerich beschrieben. Ein ähnliches Lösungskonzept kommt nach dem US-Patent 5775195 [Hae98] „*Rotary Braider Machine*“ bereits in der Rotorflechtmaschine RB-2<sup>TM</sup> zum Einsatz. Die Vorteile der Rollenbahnführung liegen in der Trennung der Führungselemente durch Wälzkörper und dem geschlossenen Gelenkaufbau, der als Gleitführungsersatz verwendeten Laufrollen, die einen nahezu schmiermittelfreien Transport der Spulenträger ermöglichen.

## **5.2 Konzept der neuartigen Fadenverlegeeinrichtung**

### **5.2.1 Struktur- und Maßsynthese**

Die Überlagerung der Rotationsbewegung des Kettfadenrotors mit der relativen Abtriebsbewegung der Fadenverlegeeinrichtung beinhaltet im Vergleich zur Hebelflechtmaschine nahezu identische, hochdynamische Anforderungen. Diese Anforderungen resultieren aus den notwendigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwerten der geforderten Verlegebewegung, die sich im Wesentlichen aus den geometrischen Randbedingungen der konventionellen Flechtspulen FSP 80/100/80 und FSP 98/100/80, bzw. den für beide Spulentypen geeigneten Spulenträgern, ergeben. Unter Berücksichtigung einer möglichst kompakten Bauweise des Gesamtkonzepts und der konstruktiven Ausführung der wälzgelagerte Rollenbahnführung resultiert der Absolutwert für die notwendige Relativbewegung zur zerstörungsfreien Fachbildung, analog der analysierten Hebelflechtmaschine, von ca. 165 mm. Die zusätzlichen zeitlichen Randbedingungen gehen aus der Rotationsbewegung der Schussfadenspulenträger hervor. Im weitesten Sinne musste zur Gestaltung der optimalen Verlegekurve, Bewegungsdesign in enger Verknüpfung mit der Maßsynthese der gewählten Getriebestrukturen betrieben werden, um eine Kollision der Kettfäden mit den Schussfadenspulenträgern zu vermeiden.

Zur Erzeugung der hochdynamischen Relativbewegung mit der geforderten Verlegefrequenz kam als Antriebseinheit des geführten Fadenstellglieds nur ein mechanisch-zwangläufiges Antriebskonzept, auf Basis der Schubkurbel (s. **Bild 5.2**), in Frage. Die festgelegten Anforderungen decken sich mit den Vorteilen, die vor allem im einfachen und somit platzsparenden Aufbau, sowie der Führungscharakteristik des Fadenstellglieds liegen. Dabei wurde das Fadenführungselement zur Verlegung des Kettfadens im Schieber integriert, der die Relativbewegung entlang je einer am Kettfadenrotor befestigten Zwei-Säulenführung, relativ zur Rotationsbewegung, ausführt. Die äußeren Spulenträger des Kettfadensystems rotieren gegengleich dem Schussfadensystem, tangential und ausrichtungskonstant um die Maschinenhauptachse und wurden auf dem Kettfadenrotor installiert. Eine zentrische Schubkurbel zur Erzeugung des geforderten Hubes wurde antriebsoptimal, entsprechend den Vorgaben der VDI 2130 [VDI2130], ausgelegt und in den Gesamtaufbau des Kettfadenrotors kollisionsfrei integriert.

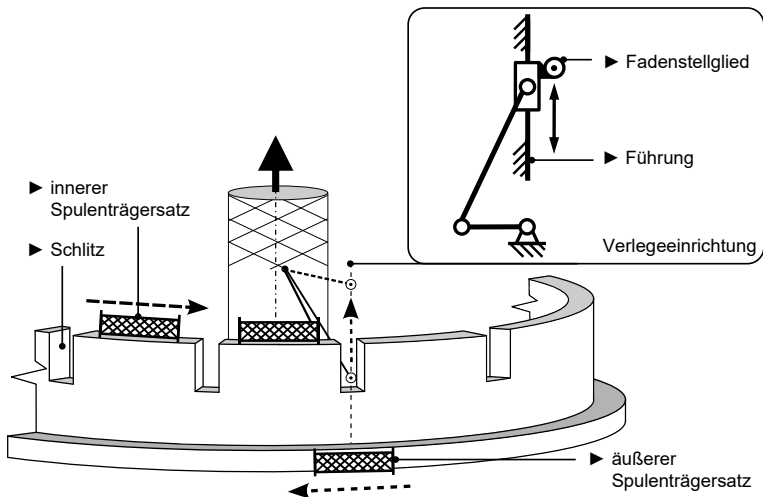


Bild 5.2: Schematischer Aufbau der Kabelflechtmaschine

Wie unter anderem in [Den12a] beschrieben, waren hierbei die Kurbelkreise der auf dem Kettfadenrotor arretierten Schubkurbel entscheidend. Die Kollisions-

sion konnte erst mit der konstruktiven Detaillierung der Getriebeglieder vollständig ausgeschlossen werden. In den ersten Überlegungen war die Kurbel starr mit einem auf dem ortsfesten Kegelradring abrollendem Ritzel verbunden. Allerdings reichten die Variationsmöglichkeiten der Übertragungsfunktion über die Exzentrizität, zur Erzeugung des benötigten Hub-Zeitverhaltens, für eine zerstörungsfreie Kettfadenverlegung nicht aus. Weiterhin waren die geometrischen Freiheiten auf dem Kettfadenrotor, welcher für eine Bindung 2 über 2 insgesamt 8 Verlegeeinheiten trägt, beschränkt.

Für das benötigte Hub-Zeitverhalten am Schieber musste daher ein mechanisches Vorschaltgetriebe zur Umformung der linear fortlaufenden Bewegung des Kettfadenrotors in eine nichtlinear fortlaufende Antriebsbewegung der Kurbel eingesetzt werden. Um eine Abtriebsbewegung des Schiebers mit angenäherten bzw. exakten Rastabschnitten zu erhalten, ist aus getriebetechnischer Sicht eine Vielzahl von Varianten denkbar. Anhand der festgelegten Anforderungen erschließen sich zunächst zwei prinzipielle Herangehensweisen zur Umformung der linear fortlaufenden Antriebsbewegung, **Bild 5.3**.

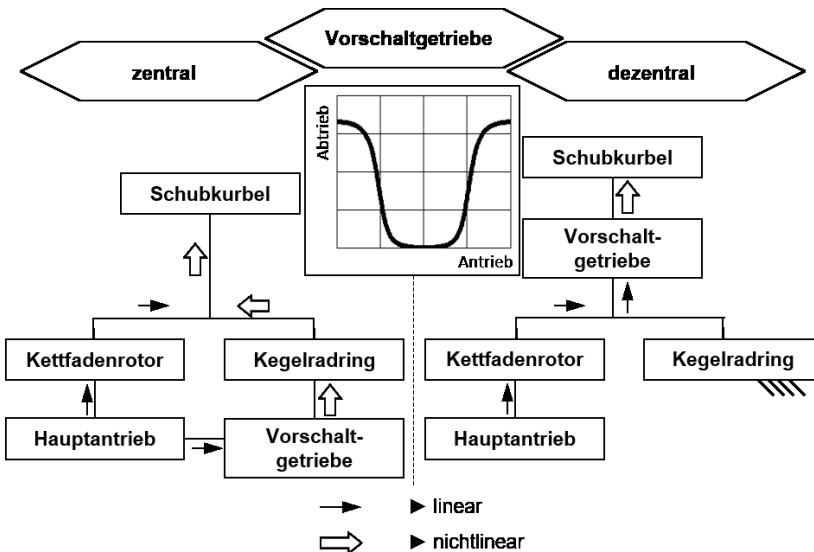


Bild 5.3: Vorschaltkonzepte für die neuartige Fadenverlegeeinrichtung



Diese unterscheiden sich darin, dass entweder ein Vorschaltgetriebe für das gesamte Kettfadensystem (zentral) eingesetzt wird, oder ein Vorschaltgetriebe je Verlegeeinheit (dezentral). Aus den genannten Antriebskonzepten ergab sich zum einen die Möglichkeit, eine konstante Drehzahl abzugreifen und diese im Nachgang für jede Verlegeeinheit über ein dezentrales Vorschaltgetriebe nichtlinear zu übersetzen. Die zweite Variante bestand aus der Erzeugung einer definierten Schwingbewegung, des in diesem Fall radial gelagerten Kegelradrings, vor dem Abgreifen. Beide Möglichkeiten haben sowohl Vor- als auch Nachteile und mussten hierfür für die konkrete Umsetzung der Vorschaltgetriebe einzeln betrachtet werden.

Das entscheidende Kriterium bei der Strukturauswahl zur Erzeugung der nichtlinearen Antriebsbewegung der Schubkurbel war die Frequenz der oszillierenden Bewegung zur Realisierung der geforderten Verlegefrequenz. Für die im zentralen Vorschaltkonzept durch Vorauswahl ermittelten, plausiblen Varianten der Kurbelschwinge, der Stephensonschen Kette und des schwingenden Kurvengetriebes, wurde mit der Maßsynthese der Grad der nichtlinearen Übersetzung bestimmt und in einem virtuellen Modell die Fachbildung überprüft. Grundsätzlich sind die genannten Varianten zur Erzeugung des benötigten Hub-Zeitverhaltens geeignet. Die Variante der Kurbelschwinge und der Stephensonschen Kette konnten auch in einem Funktionsmuster ihre Funktionalität unter Beweis stellen, wurden jedoch, aufgrund geometrischer und antriebstechnischer Ausschlusskriterien, nicht weiterführend betrachtet.

Um die nichtlineare Antriebsbewegung der Schubkurbel nach dem Abgreifen der Drehzahl am feststehenden Kegelrad zu realisieren, existieren wiederum mehrere Varianten. Eine große, nichtlineare Übersetzung ist mit Hilfe der im **Bild 5.4** dargestellten gegenläufigen Antiparallelkurbel  $A_0ABB_0$  erzeugbar. Wegen der nötigen Hilfsverzahnung war eine konstruktive Umsetzung im hochdynamischen Bereich auszuschließen. Daher wurde das Ersatzgetriebe, ein elliptisches Zahnradpaar, als Vorschaltgetriebe zur optimalen Übersetzung (Fachbildung) gewählt. Für die analytische Berechnung der Übertragungsfunktion einer elliptischen Zahnradpaarung bietet sich die Koppelgetriebestruktur der Antiparallelkurbel an. Dazu wurden zwei Brennpunkte durch Drehgelenke ersetzt und durch eine Koppel verbunden (s. Bild 5.4) [Vol68].

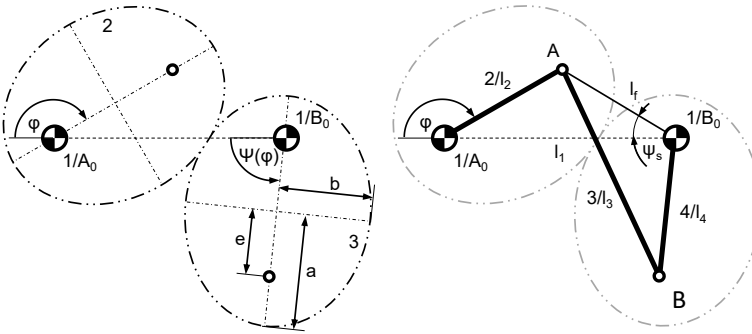


Bild 5.4: Elliptisches Zahnradpaar /Ersatzgetriebebestruktur (Antiparallelkurbel)

Die Gliedlängen  $l_1, l_2, l_3, l_4$  dieses viergliedrigen Koppelgetriebes lassen sich aus der großen Halbachse  $a$  und der Brennweite  $e$  der Ellipse wie folgt bestimmen:

$$l_1 = l_3 = \overline{A_0 B_0} = \overline{AB} = 2 \cdot a \quad (5.1)$$

$$l_2 = l_4 = \overline{A_0 A} = \overline{BB_0} = 2 \cdot e \quad (5.2)$$

Die Brennweite einer Ellipse ergibt sich aus der großen Halbachse  $a$  und der kleinen Halbachse  $b$  nach

$$e = \sqrt{a^2 - b^2}. \quad (5.3)$$

Weiterhin wird zur Beschreibung der Übertragungsfunktion die lineare Exzentrizität  $\varepsilon$  verwendet, da diese dem Gliedlängenverhältnis  $\lambda$  entspricht.

$$\varepsilon = e/a = l_2/l_1 = \lambda. \quad (5.4)$$

Durch die Einführung der veränderlichen Strecke  $l_f = \overline{AB_0}$  und deren Normierung auf den Gestellabstand  $l_1$ , kann der sogenannte Schleifenwinkel  $\psi_s$  bestimmt werden.

$$r_f(\varphi) = l_f(\varphi)/l_1 = \sqrt{1 + \lambda^2 - 2 \cdot \lambda \cdot \cos(\varphi)} \quad (5.5)$$

$$\psi_s(\varphi) = a \sin(\lambda \cdot \sin(\varphi)/r(\varphi)) \quad (5.6)$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion 0. Ordnung  $\psi_{41}(\varphi)$  und 1. Ordnung  $\psi_{41}'(\varphi)$  der Ersatzgetriebestruktur (gleichermaßen der elliptischen Zahnradpaarung  $\psi_{31}(\varphi)$  und  $\psi_{31}'(\varphi)$ ), wobei die erste Ableitung der Übertragungsfunktion der negativen Übersetzung  $-i(\varphi)$  der elliptischen Zahnradpaarung entspricht.

$$\psi_{41}(\varphi) = \varphi + 2 \cdot \psi_s(\varphi) \text{ und} \quad (5.7)$$

$$\psi_{41}'(\varphi) = \frac{d\psi}{d\varphi} = \frac{1 - \lambda^2}{r(\varphi)^2} = -i(\varphi) \quad (5.8)$$

## 5.2.2 Synthese der optimalen Verlegekurve

Das gewählte dezentrale Vorschaltkonzept (s. **Bild 5.5**) wurde bis zum Prototypenbau vorangetrieben, um zunächst die prinzipielle Eignung des gewählten Lösungsansatzes zur Verlegung des Kettfadens nachzuweisen. Im Wesentlichen konnte die Anordnung der Schubgerade, sowie die für den Flechtvorgang benötigte Hubhöhe, im virtuellen Modell und in der Praxis bestätigt werden. Auch die benötigte nichtlineare Übertragungsfunktion, resultierend aus einer Zwischenübersetzung zur Verdopplung der am Ritzel anliegenden Drehzahl und dem elliptischen Zahnradpaar zur zyklischen Überlagerung der linearen Antriebsbewegung, ist zur Fachbildung geeignet. Entscheidend ist

jedoch die maximale Übersetzung des elliptischen Zahnradpaares, die erheblichen Einfluss auf die Kinematik des Fadenstellglieds, in Form von exponentiell vergrößerten Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwerten, aufweist.

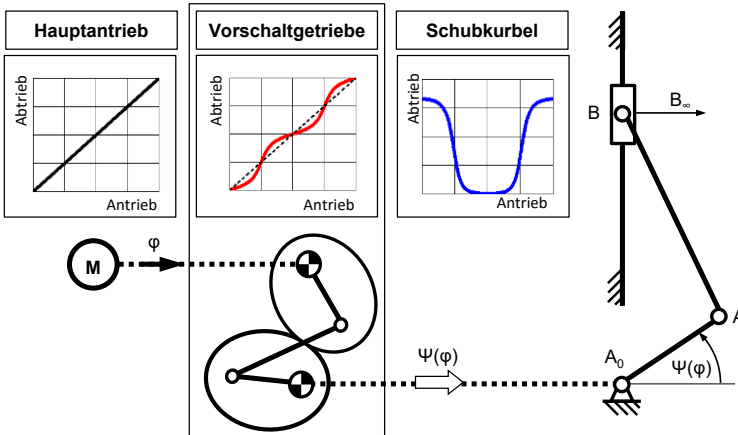


Bild 5.5: Antriebskonzept der neuartigen Fadenverlegeeinrichtung

Für das Bewegungsdesign der optimalen Verlegekurve kam ein indirektes Syntheseverfahren zum Einsatz. Dazu wurde die analytische Berechnung der Übertragungsfunktion 0. Ordnung  $\psi(\varphi)$  in der Berechnungsumgebung von *Mathcad*® parametrisch aufgebaut und anhand der konventionellen Verlegekurve (s. Bild 5.1) kinematisch verifiziert. Durch das iterative Vorgehen und der Berücksichtigung der genannten geometrischen und zeitlichen Restriktionen in einem virtuellen Modell des neuen Gesamtantriebskonzepts, konnte eine kollisionsfreie Kettfadenverlegung evaluiert werden. Die besondere Herausforderung bei der Synthese war die platzsparende und kollisionsfreie Integration der insgesamt acht Verlegeeinrichtungen, die um jeweils  $45^\circ$  versetzt auf dem Kettfadenrotor anzuordnen sind. Durch die Variation der kleinen Halbachse  $b$  gegenüber der großen Halbachse  $a$  (aufgrund von Bauraumrestriktionen konstant), konnte die maximale Übersetzung der elliptischen Zahnradpaarung, hinsichtlich des benötigten Hub-Zeitverhaltens am Schieber, zur Vermeidung von Kollisionen der Kettfäden, bestmöglich angepasst werden.

Mit Hilfe von Kollisionstests der als Stabelemente ausgeführten und gelenkig eingebauten Fäden im virtuellen Modell (s. Kapitel 4.4.3), wurde die zerstörungsfreie Flechtfadenverlegung mit geringstmöglichen Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten, entlang der Zwei-Säulenführung, ermittelt. Für weiterführende Analysen zur Verifizierung des geforderten Bewegungsverlaufs, sowie zur Ermittlung der kinetostatischen und kinetischen Kennwerte, wurde die maximale Übersetzung der elliptischen Zahnradpaarung auf  $i_{\max}$  gleich zwei festgelegt (s. **Bild 5.6** und **Anlage 9.5**). Mit Hilfe unterschiedlicher dynamischer Analysen gelang es nachfolgend sehr effizient, alle erforderlichen Kenngrößen zur Dimensionierung und konstruktiven Umsetzung zu ermitteln. Diese Schritte führten zu einem immer detaillierterem, virtuellen Modell der gesamten Antriebsbaugruppe. Vor allem Trägheits- und Fliehkräfte, die zur Optimierung des Antriebsstranges unter Aspekten der Masseeinsparung von erheblicher Bedeutung sind, konnten gezielt betrachtet und berücksichtigt werden.

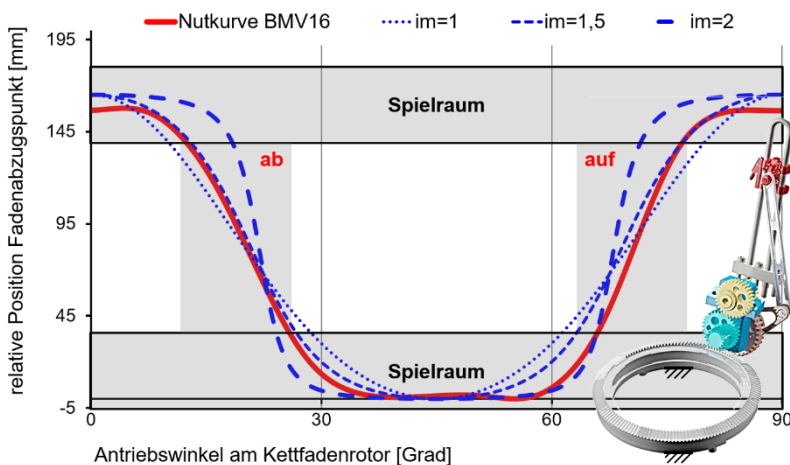


Bild 5.6: Verlegekurve mit variierenden maximalen Übersetzungen (links); konstruktiver Entwurf einer Fadenverlegeeinrichtung (rechts)

Im virtuellen Modell (s. **Bild 5.7**, links) sowie am realen Prototypen (s. Bild 5.7, rechts; Bildmaterial im Rahmen der Projektbearbeitung des ZIM-Kooperationsprojekts 2022605 zur Verfügung gestellt) des gewählten Antriebsschemas konnte die kinematische Funktionsfähigkeit, und somit das Umsetzen der Flechttechnologie, nachgewiesen werden. Um die geforderte Leistungssteigerung gegenüber den konventionellen Kabelflechtmachines zu realisieren, sind weitere gezielte Entwicklungsschritte nötig. Die Analysen und Testläufe deckten gestalterische und konstruktive Schwachstellen im System auf. Beispielsweise erwies sich die Ausführung des Fadenstellgliedes in Verbindung mit gewählten Bauweise der Geradföhrung als mehrfach überbestimmt, was zu Stick-Slip-Effekten und erhöhtem Verschleiß sowie Wärmeentwicklung föhrte (vgl. [Her10, Mei12]).

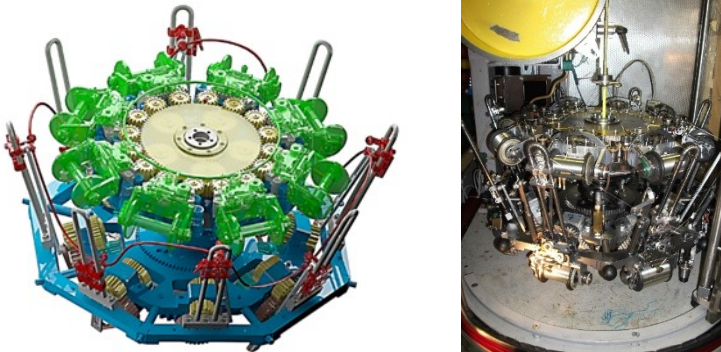


Bild 5.7: Kabelflechter: virtuelles Modell (links); realer Prototyp (rechts)

### 5.2.3 Mathematische Beschreibung der Fadenlängenänderung

Mit der steigenden Flechtleistung und der resultierenden Verlegefrequenz erhöht sich die Frequenz der notwendigen Kompensationsbewegung proportional, zum Ausgleich der schwankenden Fadenlänge und der schwankenden Fadenabzugsspannung (s. Kapitel 4.4.3). Vor allem die hochdynamische Relativbewegung des Fadenstellgliedes zur Verlegung der Kettfäden föhrt zu einer erheblichen Längenänderung der freien Fadenlänge. Diese hochdynamische

schen Anforderungen können nicht allein durch die mechanisch-passive Kompensationseinrichtung der konventionellen Spulenträger erfüllt werden. Zur verschleißarmen Verlegung der Kettfäden bei der projektierten Flechtleistung musste ein separater Fadenlängenausgleich entwickelt und in das Antriebskonzept mechanisch-zwangsläufig integriert werden. Wie unter anderem in [Den14] beschrieben, war der Ausgangspunkt der Entwicklungsaufgabe die mathematische Beschreibung der variierenden Fadenlänge während der Kettfadenverlegung. Um einer abrasiven Beschädigung der Fadenführungselemente und der einhergehenden Beschädigung des Flechtmaterials entgegenzuwirken, kamen wälzgelagerte Fadenführungsrollen zum Einsatz. Beim Umlenken des Flechtmaterials an den Rollen ist eine Änderung der Umschlingungslängen zu beobachten, die bei der mathematischen Beschreibung der gesamten Fadenlängenänderung berücksichtigt werden muss.

Unabhängig von der konstruktiv bedingten Einbaulage der Zwei-Säulenführung, sind maximal zwei Punkte mit exakt gleicher Fadenlänge vom Fadenstellglied zum Flechtpunkt gegeben. Die auszugleichende Fadenlängenänderung wurde, ausgehend vom Flechtpunkt, über das Fadenführungselement am Stellglied (Schieber), bis hin zum Fadenabzugspunkt des Spulenträgers, betrachtet. Zur Berücksichtigung der beiden signifikanten Längenänderungen infolge der Schubbewegung dienten die im **Bild 5.8** dargestellten Berechnungsskizzen. Demnach ergibt sich die Längenänderung für die Draufsicht (s. Bild 5.8, links) aus den Umschlingungslängen an der Fadenführungsrolle  $\mathbf{R}_1$  im Fadenabzugspunkt  $\mathbf{C}_0$ , an der Fadenführungsrolle  $\mathbf{R}_2$  im Punkt  $\mathbf{B}_1$  am Fadenstellglied und an der Fadenführungsrolle  $\mathbf{R}_4$  im Punkt  $\mathbf{B}_2$  am Fadenstellglied. Für die Längenänderung der Seitenansicht (s. Bild 5.8, rechts) musste die veränderliche Länge zwischen der Fadenführungsrolle  $\mathbf{R}_4$  am Punkt  $\mathbf{B}_2$  und dem Flechtpunkt betrachtet werden. Der Radius der Fadenführungsrollen  $r_R$  ist dabei als vereinheitlichte und gegebene Größe zu berücksichtigen. Das eingeführte Koordinatensystem am Kurbeldrehpunkt  $\mathbf{A}_0$  vereinfacht die analytische Beschreibung und die Einordnung ins Gesamtsystem.

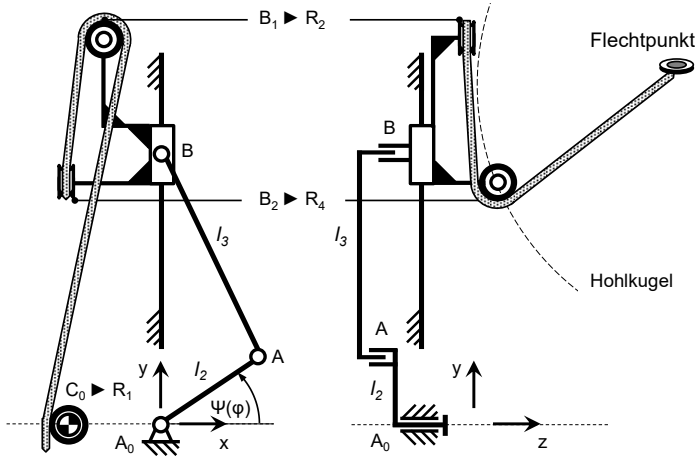


Bild 5.8: Berechnungsskizzen: Draufsicht (links), Seitenansicht (rechts)

Der Änderungsabschnitt  $\Delta L_1$  (5.9) zwischen den Fadenführungsrollen  $R_1$  und  $R_2$  wurde mit Hilfe der Kreistangentengleichung ermittelt. Die veränderliche Fadenlänge setzt sich aus drei Abschnitten zusammen: den zwei veränderlichen Umschlingungslängen an den genannten Rollen und der freien Fadenlänge. Der Abschnitt zwischen den Fadenführungsrollen  $R_2$  und  $R_4$  ist als konstant zu betrachten. Die resultierende Längenänderung wurde in Abhängigkeit der Übertragungsfunktion 0. Ordnung, der elliptischen Zahnradpaarung als Kurbelantrieb mit folgender Gleichung beschrieben:

$$\begin{aligned}
 \Delta L_1(\varphi) = & 2 * r_{R1} \left[ \pi - \arctan \left( \frac{B_{1Y} - C_{0Y}}{B_{1X} - C_{0X}} \right) \right] \dots \\
 & - 2 * r_{R1} * \arccos \left( \frac{r_{R1} - r_{R3}}{\sqrt{(B_{1X} - C_{0X})^2 + (B_{1Y} - C_{0Y})^2}} \right) \dots \\
 & + \sqrt{(B_{1X} - C_{0X})^2 + (B_{1Y} - C_{0Y})^2 - (r_{R1} + r_{R3})^2}
 \end{aligned} \tag{5.9}$$



Die Längenänderung  $\Delta L_2$  (5.10) infolge der Relativbewegung des Fadenstellglieds um den Flechtpunkt **FP**, wurde mit Hilfe des bekannten Drehpunkts **B<sub>2</sub>** und dem Radius der Abzugsrolle **r<sub>R</sub>** bestimmt. Die maximale Gesamtlängenänderung  $\Delta L$  der auszugleichenden Fadenlänge während einer Verlegebewegung ergab sich damit zu 127,4 mm. Der maximal vorhandene Kompensationsbereich des konventionellen Spulenträgers für die vorgesehene Spulengröße beträgt 30 mm. Es ist davon auszugehen, dass auch in den Hebelflechtmaschinen die Reserven der Materialelastizitäten einen Großteil der notwendigen Kompensationsbewegung abfangen, ohne eine erkennbare Schädigung des Flechtfadens hervorzurufen.

$$\Delta L_2(\varphi) = \quad (5.10)$$

$$r_{R3} \left[ \pi + \arcsin \left( \frac{FP_Y - B_{2Y}(\varphi)}{\sqrt{(FP_Y - B_{2Y}(\varphi))^2 - (FP_X - B_{2X}(\varphi))^2}} \right) \right] \dots$$

$$r_{R3} * \arccos \left( \frac{r_{R4}}{\sqrt{(FP_Y - B_{2Y}(\varphi))^2 - (FP_X - B_{2X}(\varphi))^2}} \right)$$

## 5.2.4 Entwicklung eines mechanischen-aktiven Fadenlängenausgleichs

Die Forderung nach einem mechanisch-zwangsläufigen Längenausgleich führte zu einem Lösungskonzept mit einer Ausgleichsschwinge (s. **Bild 5.9**). Aufgrund der stark nichtlinearen Ausgleichsfunktion, welche gleichzeitig die Antriebsfunktion der Ausgleichsschwinge darstellt, wurde ein Kurvengetriebe zum Antrieb der Schwinge gewählt. Als Vorgabe für den folgenden Syntheseprozess wurde der Gestellpunkt der Schwinge **D<sub>0</sub>**, aufgrund der geometrischen Gegebenheiten des Kettfadenrotors und der insgesamt acht Verlegeeinrichtungen, festgesetzt. Auf Basis dieses Gestellpunkts wurde die Hebel­länge **l<sub>4</sub>** iterativ, unter Berücksichtigung der Endlagen des Fadenstellglieds und der maximalen Gesamtlängenänderung  $\Delta L$ , ermittelt. Voraussetzung für einen effektiven Ausgleich der Längenänderung ist die Evaluierung eines

funktionalen Bewegungsbereichs der Ausgleichsrolle **R<sub>3</sub>** am Punkt **D** der Ausgleichsschwinge, der möglichst zwischen R<sub>1</sub> und R<sub>2</sub> gehalten werden muss.

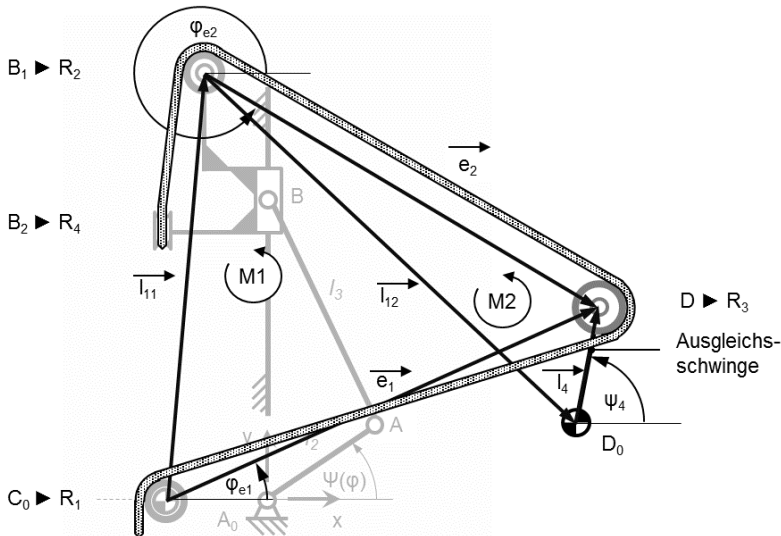


Bild 5.9: Berechnungsskizze mit Ausgleichsschwinge

Zur Beschreibung der tatsächlichen Bewegungsfunktion  $\psi_4$  der Ausgleichsschwinge, unter Beachtung einer konstanten Fadenlänge zwischen der Rolle R<sub>1</sub> und dem Flechtpunkt FP, wurden die geschlossenen Vektorpolygone **M1** und **M2** eingeführt. Diese Lösungsmethodik ist in der Getriebetechnik für alle Strukturen gültig und kann auf die gegebene Aufgabenstellung erweitert werden. Sie erlaubt die numerische Beschreibung der Bewegungszustände und deren Lösung durch ein Näherungsverfahren. Dafür wurden die für die Führung des Fadens bestimmenden Ein- und Auslaufpunkte an den Führungsrollen als geschlossene, kinematische Kette betrachtet und mit Vektoren verbunden. (vgl. [Vol68, VDI2723])

Die beiden Vektorpolygone (Maschen) konnten anschließend, mit Hilfe von vier Vektorgleichungen, beschrieben werden, welche alle bekannten und unbekannten Größen enthalten. Da das Gleichungssystem jedoch fünf Unbekannte enthielt, war die zusätzliche Einführung der konstanten Fadenlänge

als Schließbedingung notwendig, d.h. die Summe aller veränderlichen Fadenlängen im geschlossenen System  $\mathbf{b}_1$  bis  $\mathbf{b}_7$  muss immer einer vorgegebenen Bandlänge  $\mathbf{BL}$  entsprechen. Daraus ergaben sich Zwangsgleichungen (5.11), die durch das iterative Newton-Raphson-Verfahren gelöst werden mussten. Die Anwendung dieses Verfahrens für eine definierte Anzahl an Kurbelstellungen am Antrieb, ergab die gesuchte Bewegungsfunktion der Ausgleichsschwinge.

Zwangsgleichungen:

$$\begin{aligned}
 0 &= e_1 * \cos(\varphi_{e1}) - e_2 * \cos(\varphi_{e2}) - l_{11x}(\varphi_{21}) \\
 0 &= e_1 * \sin(\varphi_{e1}) - e_2 * \sin(\varphi_{e2}) - l_{11y}(\varphi_{21}) \\
 0 &= e_2 * \cos(\varphi_{e2}) - l_4 * \cos(\psi_4) - l_{12x}(\varphi_{21}) \\
 0 &= e_2 * \sin(\varphi_{e2}) - l_4 * \sin(\psi_4) - l_{12y}(\varphi_{21}) \\
 0 &= BL - (b_1(e_1, \varphi_{e1}) + b_2(e_1) + b_3(e_1, \varphi_{e1}, e_2, \varphi_{e2}) \dots \\
 &\quad + b_4(e_2) + b_5(e_2, \varphi_{e2}) + b_6(\varphi_{21}) + b_7(\varphi_{21}))
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Der Schubkurbelantrieb wurde auch als Antrieb für das Ausgleichsgetriebe genutzt, somit ist die ermittelte Funktion gleichzeitig die Übertragungsfunktion des Kurvengetriebes. Zur Bestimmung der kinematischen Hauptabmessungen für ein übertragungsgünstiges Ausgleichskurvengetriebe wurde das Näherungsverfahren nach Flocke genutzt. Voraussetzung dafür ist jedoch die Einteilung der Übertragungsfunktion in Gleich- und Gegenlaufbereich, sowie Kenntnis über die maximalen Geschwindigkeiten in genannten Bereichen. Diese Informationen standen aufgrund der berechneten Ausgleichsfunktion zur Verfügung, genauso wie der vorgegebene Achsabstand zwischen den Gestellpunkten  $A_0$  und  $D_0$ . Da das Verfahren nach Flocke jedoch mit einer vorgegebenen Hebellänge - unter dem Kriterium der zulässigen minimalen Übertragungswinkel - die Lage des Kurvenscheibendrehpunkts für F- oder P-Kurvengetriebe bestimmt, und somit der erforderliche Achsabstand festgelegt

wird, musste in diesem Fall eine fiktive Hebellänge angenommen und alle Abmessungen später auf den gegebenen Achsabstand skaliert werden. Das genaue Vorgehen, sowie die Eignung und Grenzen des genannten Verfahrens, werden von A. Heine [Hei15] in „*Ein Beitrag zur kennwertorientierten Entwicklung kurvengesteuerter, ebener Schrittgetriebe*“ beschrieben.

Zur Sicherung des Zwanglaufs wurde die Ausführung als Doppelkurvengetriebe gewählt und die Konturen für Kurve und Gegenkurve nach den gängigen Formeln berechnet. Aufgrund des Näherungsverfahrens wird das Kriterium des minimalen Übertragungswinkels nur für die Positionen der maximalen Geschwindigkeit im Gleich- und Gegenlaufbereich eingehalten. Die Kontrolle der gesamten Arbeitskurven war daher zwingend erforderlich. Neben dem Übertragungswinkel wurden auch die Krümmungen der Rollenmittelpunktbahnen überprüft, da sonst die Gefahr von Spitzenbildung bzw. Hubverlust besteht.

## **6 Prozessorientierte Synthese der neuartigen Rotorflechtmaschine „D-3F“**

### **6.1 Flechtfadenverlegung im System „D-3F“**

#### **6.1.1 Technologiesynthese der Verlegetechnik mit drei Fadensystemen**

Das schichtweise Überflechten von formgebenden Flechtkernen kann nicht zuletzt durch die am Markt verfügbare Analgentechnik als Stand der Technik angesehen werden. Kern dieser konventionellen Fertigungsprozesse zur Herstellung von belastungsgerechten Halbzeugen oder Preforms sind Rund- oder Radiaalflechtmaschinen, basierend auf dem Gangbahn-Flügelrad System. Die Verstärkungsmaterialien werden dabei in der Regel in Form eines triaxialen UD-Geflechts auf einem multiaxial geführten Flechtkern abgelegt. Die Vorteile eines UD-Geflechts liegen in der, dem unidirektionalen Gelege ähnlichen, Charakteristik und der einhergehenden Reduktion von Faserumlenkungen bzw. der Ondulation, resultierend aus der gekreuzten Bindungsstruktur. Diese Bindungsstruktur wird mit der charakteristischen Flechtfadenverlegung entlang einer gestellfesten Gangbahn und der Zuführung ortsfester Stehfäden durch die Flügelräder hindurch realisiert. Der entscheidende technologische Vorteil des Systems „Horn“ ist die abzugsideale und ausrichtungskonstante Spulenanordnung, tangential hinsichtlich der Maschinenhauptachse. In Verbindung mit der speziellen Flechtfadenverlegung - ähnlich dem Webprozess - ohne die Überlagerung der Verlegebewegung in Form der Gangbahn, ergeben sich eine quasi lageparallele Ablage des Flechtmaterials auf dem Flechtkern und die einhergehende Homogenität des Flechtprodukts. Gleichzeitig ist die gesteigerte Flechtgeschwindigkeit, aufgrund des Maschinenkonzepts mit der gegengleichen Rotationsbewegung zweier Rotoren, für die wirtschaftliche Serienfertigung von Vorteil.

Zielstellung der vorliegenden Arbeit bestand darin, das Potential des Systems „Horn“ zur Herstellung von Halbzeugen oder endkonturnahen Preforms durch Überflechten in einem ringförmigen Antriebskonzept mit großer Durchgangsöffnung zu erschließen. Mit der durchgeführten, partiellen Optimierung einer

konventionellen Hebelflechtmaschine zeigten sich konzeptbedingte Einschränkungen zum Überflechten formgebender Flechtkerne und fehlende Alternativen zur schädigungsarmen Zuführung von Stehfäden. Demnach erschien für die direkte Zuführung eines ortsfesten Fadensystems, analog der Rund- oder Radialflechtmaschinen, weder der konzeptionelle Aufbau noch die Verlegetechnik des Systems „Horn“ (vgl. Kapitel 4.3) bzw. des Systems „Kabelflechter“ (vgl. Kapitel 4.5), geeignet. Die grundlegende Voraussetzung zur schädigungsarmen Verarbeitung von Verstärkungsmaterialien ist in beiden Systemen nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand realisierbar. Die Herausforderung der notwendigen Technologiesynthese bestand demzufolge in der Integration eines dritten, ortsfesten Fadensystems in eine faserschonende und antriebstechnisch umsetzbare Verlegetechnik zur Fertigung einer triaxialen Flechtstruktur auf Basis des Systems „Horn“. Von entscheidender Bedeutung waren die Interpretation und Funktionalisierung in einem ringförmigen Antriebskonzept mit großer Durchgangsöffnung und möglichst symmetrisch zentrierter Anordnung um den Flechtpunkt.

Der Ausgangspunkt zur Verwirklichung der gestellten Aufgabe war die kritische Studie und Analyse der Anforderungsspezifikationen, resultierend aus den technologischen Vorgaben einer triaxialen Flechtstruktur. Die Isolation der zur Herstellung von Preforms mit bestimmten Eigenschaften notwendigen Parameter, setzte die gleichzeitig freie Betrachtung aller flechttypischen Charakteristika, hinsichtlich des Einsatzes in FV-Bauteilen, voraus. Das Auflösen der Zwangsvorgaben, resultierend aus der Verlege- und Antriebstechnik der Flechtsysteme, stellte somit die Grundvoraussetzung der folgenden Technologiesynthese dar. Demnach entstand durch die logische und physikalisch realisierbare Verknüpfung der zur Bindungserzeugung mit drei Fadensystemen notwendigen Schritte eine neue gewebeartige Bindungsstruktur. Ziel des folgenden, prozessorientierten Syntheseverfahrens (vgl. Kapitel 2.1.3) war deren Überführung in eine antriebstechnisch realisierbare Verlegetechnik zur kinematisch optimalen und faserschonenden Verarbeitung des Verstärkungsmaterials. Basis für die iterative Synthese der Antriebstechnik war die Parameteridentifikation der zum Überflechten geeigneten Flechtsysteme und die Isolation der getriebetechnisch und konstruktiv geeigneten Elemente zur Herleitung der neuartigen Bindungsstruktur. Durch die Neukombination dieser wesentlichen Teilfunktionen und Teilfunktionsträger (vgl. Tabelle 4.3) der analysierten Flechtsysteme, konnte eine zielführende, mechanisch-zwangläufige

Antriebslösung für die Gestaltung eines Fertigungsprozesses zur Herstellung von belastungsgerechten Preforms ermittelt werden.

Als Grundvoraussetzung der Technologiesynthese wurde die Verlegung der Flechtfäden entlang einer angenäherten Hohlkugel um einen fixierten Flechtpunkt festgelegt. In Anlehnung an die Verlegetechnik des Systems „Horn“, wurde die gegengleiche Rotationsbewegung zweier Flechtfadensysteme mit abzugsidealener und ausrichtungskonstanter Spulenanordnung übernommen. Diese Rotationsbewegung ist aufgrund der konstant fortlaufenden Bewegungsform aus antriebstechnischer Sicht für eine hohe Flechtgeschwindigkeit geeignet. Weiterhin finden demnach keine Überlagerungen der Verlegebewegungen statt. Die aus dem System „Horn“ bekannten Zwangsvorgaben, hervorgehend aus der Relativbewegung des Kettfadens zur Fachbildung, wurden im Folgenden kinematisch aufgelöst. Unter der Voraussetzung eines zylindrischen Flechtkerns, der koaxial zur Maschinenhauptachse geführt wird, verlegen die genannten Flechtfadensysteme zwei lageparallele und einander überlagernde Schichten von Schuss- bzw. Legefäden mit jeweils gegengleicher Orientierung und ohne Ondulation. Diese Schichten aus unidirektional und spiralförmig abgelegtem Verstärkungsmaterial entsprechen im weitesten Sinne einem zweilagigen Gelege. Die unidirektionale Orientierung der beiden Schichten kann analog dem Flechtwinkel über die Variation der Abzugs geschwindigkeit bereichsweise reguliert werden und erlaubt eine kraftflussgerechte Faserorientierung der beiden Fadensysteme. Zur Überführung und Interpretation in der Verlegetechnik wurden zwei rotierende innere Fadensysteme, mit tangentialer Ausrichtung der Spulenachsen hinsichtlich der Maschinenhauptachse und gegengleicher Rotationsbewegung, auf je einem Breitengrad um die Maschinenhauptachse festgelegt. Die Breitengrade weisen je gegengleichen Abstand zum Flechtpunkt, koaxial zur Maschinenhauptachse, auf. Jeder Schussfaden besitzt dadurch die gleiche, freie Länge vom Fadenabzugspunkt bis hin zum Flechtpunkt.

Die eingangs vernachlässigte Relativbewegung zur Fachbildung und Bindungserzeugung wird dem verbleibenden dritten, ortsfesten Fadensystem zuteil. Zur Ausbildung von Querverbindungen der Schichten untereinander sowie zur Herleitung eines geschlossenen textilen Charakters, wurde das genannte Fadensystem außenliegend angeordnet und entlang einer hauptsächlich axialen Relativbewegung zur Fachbildung verlegt. Die Verlegebewegung dieser Kettfäden musste derart gestaltet werden, dass ein zerstörungsfreies

Passieren des Faches beider Schussfadensysteme ermöglicht wird. Diese neuartige Verlegetechnik (s. Bild 4.2) kombiniert die Eigenschaften eines lageparallelen Geleges aus zwei Schichten mit einer gewebeartigen und quasi dreidimensionalen Bindungsstruktur. Analog dem bekannten UD-Geflecht könnte das Flechtmaterial des Kettfadensystems derart gewählt werden, dass lediglich die Aufgabe des Lagefixierens realisiert wird. Der vergleichsweise geringe Fadenquerschnitt führt zu einer Vermeidung von Faserumlenkungen, erlaubt jedoch keine Aufnahme von Belastungen.

Das Ergebnis der logischen Interpretation der neuartigen Verlegetechnik in einem Rotorflechtmaschinen System auf Basis des Systems „Horn“ wird im folgenden **Bild 6.1** gezeigt. Das Rotorflechtmaschinen System „**D-3F**“ entspricht der zielgerichteten Kombination aller flechttypischen Charakteristika, in einem zur Fertigung von Preforms geeigneten Anlagenkonzept, mit tangentialer Spulenachsenausrichtung und lageparalleler Flechtadenverlegung. Die Fertigung der Preforms erfolgt demnach durch das „Überflechten“ mit der neuen gewebeartigen Bindungsstruktur als Kombination aus Gelege und Geflecht bzw. Gewebe: „**D-3FG**“ (s. Bild 4.2). Die im Zuge der Bearbeitung eingereichten Unterlagen zur Patentanmeldung mit dem Titel „*Flechtvorrichtung und Flechtverfahren zum Überflechten eines Flechtkerns*“ stellen die Grundlage für die Anmeldung mit dem Aktenzeichen „102014016832.8“ dar (s. **Anlage 9.1**). Laut Patentanspruch wird die antriebstechnische Funktionalisierung der neuartigen Verlegetechnik in einem ringförmigen Antriebskonzept wie folgt gelöst:

- *„Mindestens einen ersten Spulenträgersatz und mindestens einen zweiten Spulenträgersatz, wobei zumindest einer der beiden Spulenträgersätze entlang einer Kreisbahn bewegbar ist, wobei zwischen den beiden Spulenträgersätzen beim Überflechten des Flechtkerns eine Relativbewegung ausführbar ist, und wobei durch die Relativbewegung, die von den Spulenträgern der beiden Spulenträgersätze jeweils abgezogene Fäden als sich kreuzende Schussfäden um den Flechtkern ableibar sind,“*
- *„Mindestens einen dritten, ortsfest angeordneten Spulenträgersatz, und“*



- „Mindestens ein Stellelement, wobei die beim Überflechten des Flechkerns von den Spulenträgern des dritten Spulenträgersatzes abgewickelten Fäden, durch das mindestens eine Stellelement in eine oszillierende Auf- und Abbewegung versetzbar und dabei als Kettfäden unter Ausbildung einer Bindung abwechselnd über und unter die Kreuzungsstellen der Schussfäden verlegbar sind.“

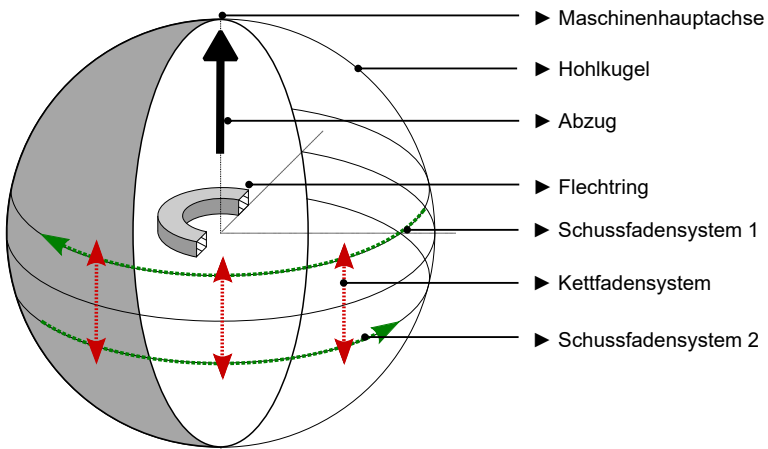


Bild 6.1: Rotorflechtmaschinen System „D-3F“

### 6.1.2 Antriebskonzept zur Funktionalisierung des Systems „D-3F“

Basis für die antriebstechnische Funktionalisierung der neuartigen Verlegetechnik in einem ringförmigen und kompakten Antriebskonzept war eine Funktionsstruktur (vgl. Kapitel 2.1.1) zur sinnfälligen Gliederung der prozessbestimmenden Wirkzusammenhänge der neuen Verlegetechnik. Die definierten Schwerpunkte und Zielsetzungen der Arbeit beziehen sich im Wesentlichen auf die Kinematik zur Umsetzung der Verlegebewegungen, unter Vernachlässigung des Energie- und Informationsflusses. In der Hauptfunktion wurden daher zunächst die zur Fertigung von Preforms unerlässlichen Teilfunktionen des „Zuführens von Verstärkungs-/ Flechtmaterial“, des „Verlegens der

Flechtfäden“ und des „**Führen**s eines Flechkerns“ zusammengefasst und als Stoffumsatz vom Verstärkungsmaterial zum Preform betrachtet, **Bild 6.2**. Die Synchronisation und Optimierung der Flechtfadenverlegung erfolgte im Verlauf der prozessorientierten Synthese und mit Hilfe des zielgerichteten Einsatzes von CAD- und MKS Funktionalitäten in einem Synthesemodell (vgl. Kapitel 2.1.3). Im Synthesemodell wurde der grundlegende Lösungsansatz des ringförmigen Antriebskonzepts direkt mit einer kinematischen Prozesssimulation gekoppelt.

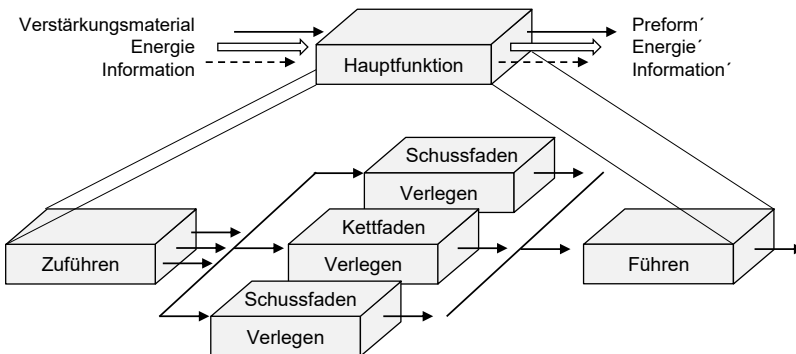


Bild 6.2: Funktionsstruktur der „D-3F“

Die Teilfunktion des „Zuführens von Verstärkungs-/ Flechtmaterial“ ist in den Spulenwechsel und das Anflechten zerlegbar. Für die Synchronisation und Optimierung der Flechtfadenverlegung spielt diese Teilfunktion eine untergeordnete Rolle und wird demnach vernachlässigt. Aufgrund bekannter und funktionsfähiger Spulenträger mit tangentialer Aufnahme der Spulen hinsichtlich der Maschinenhauptachse, kann von einer Adaptierbarkeit auf die Verarbeitung von Verstärkungsmaterialien ausgegangen werden. Um eine möglichst faserschonende Handhabung der Flechtmaterialien zu gewährleisten, müssen die Art, Anzahl und Anordnung der Fadenführungselemente, sowie ein entsprechender Kompensationskreislauf zum Regulieren der Fadenabzugsspannung, aufeinander abgestimmt werden. Der Entwicklungsaufwand für einen neuen Spulenträger ist ein weitreichendes und komplexes Themengebiet und kann nur unter direkter Betrachtung der im Flechkopf vorherrschenden Gegebenheiten bearbeitet werden. Als Basis der Überlegungen

wird die im Bild 3.22 gezeigte Anordnung empfohlen, da eine Umlenkung senkrecht gegen die Banebene des Rovings vermieden wird und somit ein rein tangenciales Abzugsverhalten entsteht. Die Automatisierung des Spulenwechsels und des Anflechtvorgangs ist nach dem Stand der Technik in keiner verfügbaren Flechtmaschine umgesetzt und würde einen enormen Entwicklungsaufwand bedeuten.

Auch das „Führen eines Flechtkerns“, koaxial zur Maschinenhauptachse oder entlang einer vorgegebenen Bahnkurve, zur gezielten und konturadaptiven Fadenablage, respektive der einzusetzenden Flechtringe, spielt für die Synchronisation und Optimierung der Flechtfadenverlegung eine zunächst untergeordnete Rolle. Für die Synthese und den Aufbau des Synthesemodells wird diese Teilfunktion vereinfacht, in Form idealisierter Prozessparameter für einen zylindrischen Querschnitt, berücksichtigt. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die periphere Handhabung des Flechtkerns und weitere Teilfunktionsträger von der am Markt verfügbaren Anlagentechnik übernommen werden kann.

Primär wurde die Teilfunktion des „Verlegens der Flechtfäden“, unter Vernachlässigung des Energie- und Informationsflusses, betrachtet und in weitere Funktionsbausteine untergliedert. Für die Synchronisation der Verlegebewegungen und die folgende Gestaltung der kinematisch optimalen Kettfadenverlegung im neuartigen Antriebskonzept bestand die Notwendigkeit zur Definition von Prozesspunkten zur Beschreibung der Verlegebewegung. Eine einfache Adaption der bekannten Verlegekurve der Hebelflechtmaschinen war, aufgrund der gestellfesten Anordnung des Kettfadensystems und des zusätzlichen Schussfadensystems, nicht möglich. Die kinematisch optimale Verlegung der Kettfäden zeichnet sich jedoch auch im System „**D-3F**“ durch die kollisions- und zerstörungsfreie Fachbildung aus. Dabei waren die zeitlichen und geometrischen Minimalanforderungen der synchronisierten Schussfadenverlegung, die technologischen Vorgaben der neuartigen Bindungsstruktur und die konstruktiven Gegebenheiten eines ringförmigen Gesamtaufbaus mit großer Durchgangsöffnung zu berücksichtigen. Der Flechtkopf selbst teilt sich in die gegengleich rotierenden Schussfadensysteme und ein Kettfadensystem auf. Für die Bindungsstruktur des „**D-3FG**“, mit einer Fachbildung pro Kreuzungsstelle, war je die gleiche Anzahl an Schussfäden und Kettfäden im Flechtkopf vorzusehen. Die Anzahl an Schlitzen für jede Gleitbahn entspricht der Anzahl an zu verlegenden Kettfäden.

Demnach definieren sich die wesentlichen Anforderungen an die formschlüssige und schlupffreie Bewegungsübertragung zur Realisierung der Verlegtechnik wie folgt:

- Gegengleiche Rotationsbewegung der Schussfadensysteme
- Fliegende Lagerung der Schussfadenspulenträger (Berücksichtigung der Schlitze)
- Positionierung und Synchronisation der Schussfadensysteme
- Relativbewegung des Fadenstellglieds zur Verlegung der Kettfäden
- Synchronisation der Kettfadenverlegung mit der Schussfadenverlegung

Für den gewählten Lösungsansatz zur Funktionalisierung des Systems „**D-3F**“ in einem ringförmigen Antriebskonzept wurden die Schussfadenspulenträger auf Schlitten befestigt. Diese wurden über Führungsflächen fliegend und in einem definierten Abstand zueinander, auf einer ringförmigen und gestellfesten Gleitbahn, gelagert. Dazu war es erforderlich beide Gleitbahnen koaxial zueinander und demnach koaxial zur Maschinenhauptachse auszurichten, **Bild 6.3**. Der Abstand beider Gleitbahnen zueinander wurde, symmetrisch um einen frei gewählten Flechtpunkt und konform den geometrischen Gegebenheiten, minimiert. Jede Gleitbahn wurde in äquidistanten Abständen geschlitzt. Grund der gewählten Bauweise mit fliegender Lagerung und geschlitzter Gleitbahn ist die zerstörungsfreie Fachbildung des Kettfadens in Abhängigkeit der rotierenden Schlitten. Um die Fachbildung der Kettfäden zu ermöglichen, mussten die Schlitzöffnungen der gegenüberliegenden Schlitze zueinander ausgerichtet werden. Für die Erzeugung der neuen gewebeartigen Bindungsstruktur muss das dritte Flechtfadensystem durch je ein Fadenstellglied vom äußeren und ortsfesten Spulenträgersatz abgezogen und oszillierend von einem tiefer gelegenen Breitengrad zu einem höher gelegenen Breitengrad verlegt werden. Durch diese Verlegebewegung bilden die Kettfäden Fächer zum kollisionsfreien Passieren der Schussfadenspulenträger aus und werden dabei über bzw. unter die Kreuzungsstellen der Schussfäden verlegt. Das Öffnen und Schließen eines Faches erfolgt in den Zeitfenstern, in denen die Schlitten nicht über die Schlitze der Gleitbahn geführt werden.

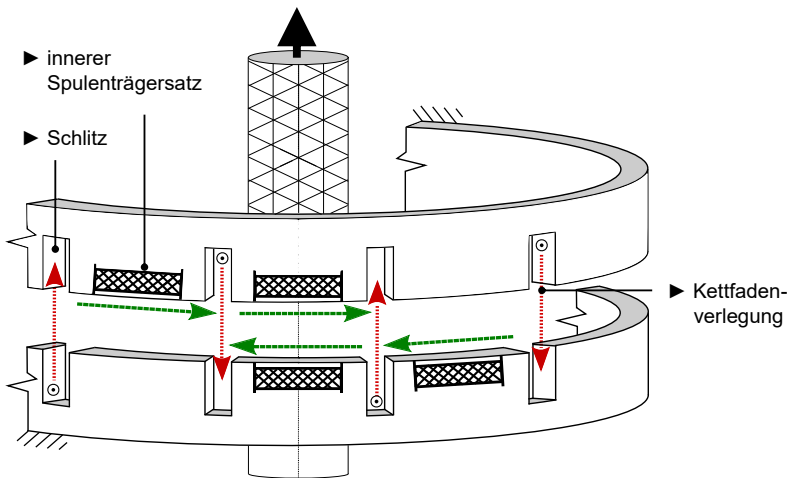


Bild 6.3: Schematischer Aufbau der Rotorflechtmaschine „D-3F“

Mit dem erfolgreichen Nachweis der grundlegenden Funktionalität im realen Prototyp (s. Bild 5.7) des ZIM-Kooperationsprojekts 2022605, bietet sich der Einsatz eines geführten Fadenstellglieds mit einer optimalen konstruktiven Ausführung an. Um die dynamischen Vorteile eines geführten Fadenstellglieds hinsichtlich der Schwingungsanregungen des Kettfadens sowie der zu erreichenden Flechtgeschwindigkeit optimal ausnutzen zu können, müssen die Gelenkfreiheitsgrade des gewählten konstruktiven Aufbaus bereits im Syntheseprozess berücksichtigt werden. Vor allem aber die offensichtliche Problematik der Fadenlängenänderung führte im Prototyp des Kabelflechters zu einer vermehrten Anzahl an Fadenbrüchen während des Flechtvorgangs. Die eigentliche Leistungsbeschränkung der Kettfadenverlegung resultiert demnach aus der Fadenlängenänderung durch die auszuführende Relativbewegung zur Fachbildung, die in Verbindung mit Schwingungsanregungen zur Beschädigung bzw. zum Riss der Kettfäden führt. Demnach wurde zunächst die idealisierte Verlegebewegung des Fadenstellglieds zur Verlegung des Kettfadens entlang eines Längengrades der Hohlkugel herangezogen und hinsichtlich der resultierenden Längenänderung analysiert, **Bild 6.4**. Demnach stellt sich die freie Länge des Kettfadens vom Fadenabzugspunkt zum Flechtzentrum unter idealisierten Bedingungen als konstant heraus. Vor allem aber über die mathematische Beschreibung der Fadenlängenänderung vom

ortsfesten Fadenabzugspunkt der Kettfadenspule über das Fadenstellglied hin zum Flechtpunkt (vgl. Kapitel 5.2.3) konnte die Längenänderung im Wesentlichen auf den Bereich vom Fadenabzugspunkt bis zum bewegten Fadenstellglied reduziert werden. Zudem gilt, je größer der Durchmesser des ringförmigen Antriebskonzepts bei gleicher Spulengröße, desto geringer wirken sich die Einflüsse der Längenänderung auf den Flechtprozess und das Zusammenziehen der Flechtfäden aus (vgl. Kapitel 4.4).

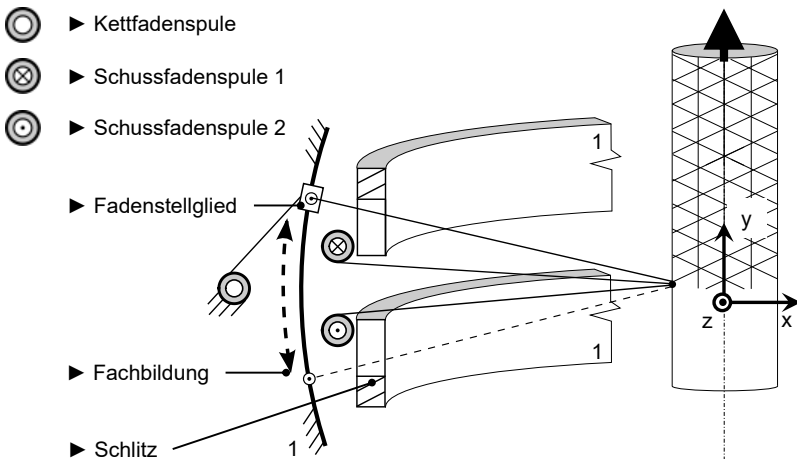


Bild 6.4: Kinematisches Schema der Kettfadenverlegung

Vor allem aus antriebstechnischer und konstruktiver Sicht erscheint daher der Einsatz einer linearen Geradföhrung deutlich unkomplizierter. Für das Synthesemodell und die Entwurfskonstruktion der Rotorflechtmaschine „D-3F“ wurde daher zur verschleißarmen Handhabung der Kettfäden ein kinematisch optimierter Antrieb des Fadenstellglieds entlang einer Geradföhrung vorgesehen. Im Gegensatz zum System Kabelflechter muss im vorgeschlagenen System die Fadenlängenänderung nicht durch ein mechanisch-zwangläufiges Ausgleichsgetriebe reguliert werden. Die ortsfeste Anordnung der Kettfäden erlaubt den unkomplizierten Einsatz elektronisch geregelter Kompensations-einrichtungen. Ein weiterer Vorteil der ortsfesten Anordnung besteht in der Möglichkeit einen sehr großen Fadenspeicher vorzusehen.

## 6.2 Synthesemodell für das ringförmige Antriebskonzept

### 6.2.1 Technologische Vorgaben des Synthesemodells

Die wesentlichen Prozesspunkte zur Synchronisation und Optimierung der Flechtfadenverlegung durch die prozessorientierte Synthese resultieren aus dem Aufbau und der Anzahl der Schussfadenspulenträger sowie deren gegengleicher Rotationsbewegung und Drehzahl. Ausgangspunkt für die Gestaltung der kinematisch optimalen Kettfadenverlegung im Antriebskonzept der neuartigen Rotorflechtmaschine „D-3F“ waren die grundlegenden technologischen Randbedingungen des neuartigen Fertigungsverfahrens, in Anlehnung an den idealen Flechtprozesses (vgl. Kapitel 3.2.6). Vor allem die Verlegung der Schussfäden kann in der isolierten Betrachtung der Fadensysteme dem lageparallelen Umwickeln eines Kerns gleichgesetzt werden. Demnach wurden für die Synthese und notwendige Kalkulationen alle reibungsbehafteten Gleiteffekte vernachlässigt. Eine Ondulation findet aufgrund der schichtweisen Ablage nicht statt. Die somit vereinfachten und rein geometrischen Zusammenhänge der Produktvorgaben mit der neuen gewebeartigen Bindungsstruktur konnten analog zum bereits in Kapitel 2.4.2 gezeigten Aufbau von Geflechten beschrieben werden. Demnach sind die entscheidenden Parameter der Flechtwinkel  $\alpha$  und der Bedeckungsgrad  $FD$ , die zum einen für den Produktaufbau und zum anderen für den Aufbau der Flechtmaschine Rechenschaft tragen. Über die Flechtdichte im idealen Geflecht ist der Zusammenhang über die Anzahl an Fläche ausbildenden Flechtfäden analytisch beschrieben. Konventionelle Flechtmaschinen sind beispielsweise über die Anzahl an eingesetzten Spulenträgern einer definierten Bandbreite an Produktvorgaben zuordenbar. Im Speziellen bestimmt sich darüber der mögliche Zylinderradius, bei gefordertem Flechtwinkel und gegebener Flechtfadenbreite. Auch in der neuartigen Bindungsstruktur sind zwei Fadensysteme (Schussfäden) für die Ausbildung der - im weiteren Verlauf wie im konventionellen System bezeichnet - Flechtdichte zuständig.

Mit der Spulengröße wird neben der darauf abgelegten Fadenlänge, in Abhängigkeit des Flechtmaterials, auch der konstruktive Aufbau der Spulenträger definiert. Aus dem Gesamtgewicht des bestückten Spulenträgers, in Verbindung mit der geforderten Drehzahl, resultieren die wesentlichen kinemati-

schen und kinetostatischen Eingangsgrößen für die geometrische und konstruktive Ausführung des Schuss- sowie Kettfadensystems. Die Hauptbestandteile des Schussfadensystems sind die Spulenträger und die geschlitzte Gleitbahn, sowie die als Bindeglied zum Transport und der Bewegungsübertragung unerlässlichen Schlitten. Das Kettfadensystem bestand in den ersten Überlegungen im Wesentlichen aus dem geführten Fadenstellglied. Diese gezielte Minimierung der Eingangsgrößen erlaubte eine effiziente Beurteilung der grundlegenden physikalischen, getriebetechnischen und konstruktiven Machbarkeit des Antriebskonzepts zur Erzeugung der Verlegebewegung und das Ableiten von Prozesspunkten zur Synthese der Kettfadenverlegeeinrichtung. Um die dynamischen Anforderungen, resultierend aus den notwendigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwerten der zu entwickelnden Kettfadenverlegung, mit den Analyse- und Entwicklungsergebnissen des Hebelflechters bzw. des Kabelflechters vergleichbar zu gestalten, wurde die grundlegende Synthesemethodik für ein 8-spuliges Schussfadensystem mit marktüblichen Flechtspulen FSP 80/100/80 oder FSP 98/100/80 gewählt. Der bekannte Spulenträger stellte demnach die entscheidende Eingangsgröße zur Ermittlung der Prozesspunkte, unter Berücksichtigung der geschlitzten Gleitbahn, in den gegengleich rotierenden Schussfadensystemen dar.

Ausgangspunkt für die prozessorientierte Synthese war der parametrische Aufbau eines Synthesemodells, in Anlehnung an die bereits beschriebene Vorgehensweise zur Analyse einer Hebelflechtmaschine (s. Kapitel 4.3) und zur kinematischen Prozessbeschreibung (s. Kapitel 4.4.3) in *Creo 3.0®*. Grundsätzlich wurden die in Wechselwirkung stehenden Bestandteile des Schussfadensystems als Skelettbauteile modelliert und in einem virtuellen Modell implementiert (vgl. [Ill15]). In Erweiterung der geometrischen Eingangsgrößen wurden die kinematischen Vorgaben an das Schussfadensystem und den Abzug, über die beispielhaften Vorgaben des neutralen Flechtwinkels auf einem zylindrischen Flecht kern, der Flechtgeschwindigkeit und der resultierenden Abzugsgeschwindigkeit, getroffen. Als gemeinsamer Bezugspunkt des Synthesemodells wurde der ideal symmetrische Flecht punkt, hinsichtlich der beiden Breitengrade um die Maschinenhauptachse, gleich dem Mittelpunkt **MP** als Koordinatenursprung (s. Bild 6.4) festgesetzt.



Im Folgenden wurden die Hauptbestandteile des Synthesemodells in Aufbauskizzen zusammengefasst und mit farblich differenzierten Abmessungen versehen:

- Schwarz definiertes Maß
- Grau für die Berechnung erforderliches Zwischenmaß
- Gelb Parameter/ vorläufig definiertes Maß
- Blau errechnetes Maß

Zur Definition der geometrischen und kinematischen Gegebenheiten der Schussfadenspulenträger, wurde eine großzügige Einhausung der Flechtspulen vorgenommen. Diese Einhausung ist von der näherungsweise elliptischen Form eines Fadenleitblechs abgeleitet und über den Strahlensatz vom Flechtspunkt aus als Hilfskörper um die Spule erweitert. Die elliptische Form ergibt sich aus der Betrachtung und der zeichnerischen Erfassung einer einhüllenden Bewegung des Kettfadens um die Spule herum. Mit der Überführung der ebenen, einhüllenden Form in einen, die Spule umgebenden, Körper ergab sich ein schiefer Kegelstumpf, **Bild 6.5**.

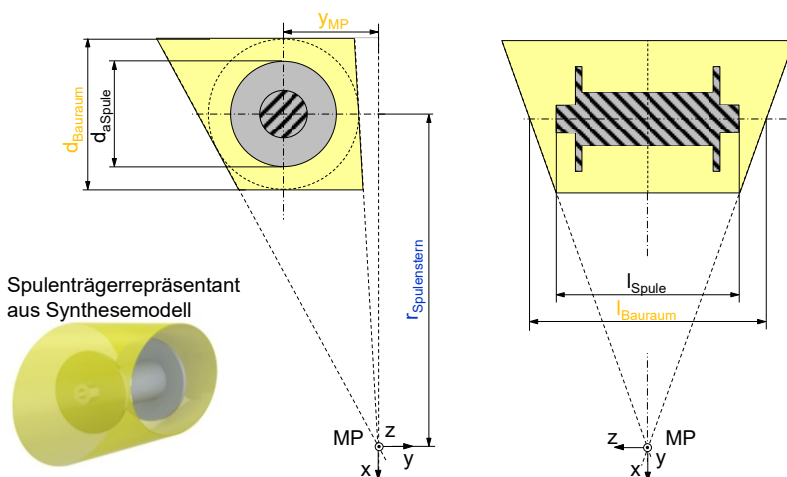


Bild 6.5: Abmessungen der Spule und des Spulenträgerrepräsentanten

Für die gezeigte Einhausung der Flechtspulen war der Abstand der Spulen radial, in Bezug auf die Maschinenhauptachse  $r_{\text{Spulensterne}}$  und axial, in Bezug auf den Mittelpunkt  $y_{\text{MP}}$  notwendig. Während der axiale Abstand ein vorläufig definiertes Maß darstellt, unterliegt der radiale Abstand funktionalen Anforderungen. Der minimale, technologisch erforderliche Abstand zur Maschinenhauptachse ergibt sich unter Berücksichtigung der Geometrie des Spulenträgerrepräsentanten und der Anzahl an Spulenträgern pro Schussfadensystem. Im **Bild 6.6** ist die Gleitbahn in verschiedenen Perspektiven zur Verdeutlichung der funktionalen Abmessungen dargestellt. Der Radius des Spulensterns muss mindestens so groß sein, dass der einhüllende Körper bei entsprechender Positionierung zwischen zwei Schlitzen angeordnet werden kann, ohne diese zu tangieren. Demnach wurde die Schlitzbreite  $b_{\text{Schlitz}}$ , analog der Hebelflechtmaschine, auf 20 mm festgesetzt. Der Verteilungswinkel  $\sigma$  ergibt sich über die Anzahl an zu verlegenden Kettfäden  $N_{\text{KF}}$  bzw. die Anzahl an Schlitzen  $N_{\text{Schlitz}}$ , verteilt auf  $360^\circ$  zu  $22,5^\circ$ .

Über die geometrische Verteilung ließ sich der Konstruktionsparameter für den minimalen funktionalen Abstand der Spulenträger zur Maschinenhauptachse  $r_{\text{Spulensterne}}$ , gemäß folgender Gleichung, iterativ auf ca. 555mm bestimmen:

$$\frac{r_{\text{Spulensterne}}}{\sin(0,5 * \beta)} = \frac{l_{\text{Bauraum}}}{2 * \sin(\gamma)} \quad (6.1)$$

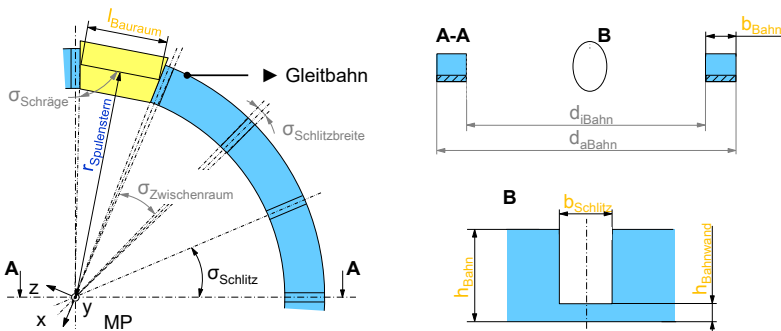


Bild 6.6: Abmessungen der Gleitbahn und eines Schlitzes

Mit der Forderung der minimal notwendigen Relativbewegung zur Verlegung des Kettfadens und der maximal möglichen Durchgangsöffnung, bei gleichzeitig kompakter Bauweise, wurde die Ausrichtung der Spulenträger, hinsichtlich der geschlitzten Gleitbahn, in der xy-Ebene analysiert. Grundsätzlich waren für die Führung des Spulenträgers drei Varianten plausibel, **Bild 6.7**. Zur Bewertung hinsichtlich der genannten Kriterien, wurde für jede Variante der innerste Radius  $r_{\text{Spulensterne}}$ , der äußerste Radius  $r_{\text{aSpulensterne}}$  und die Relativbewegung  $y_{\text{Kett}}$  mit Hilfe des Strahlensatzes bestimmt. Dazu wurde der bereits bekannte Mindestradius des Spulensterns  $r_{\text{Spulensterne}}$  als Bezugsgröße für die Vorgabe der Breite der Gleitbahn  $b_{\text{Bahn}}$  herangezogen. Um eine zerstörungsfreie Fachbildung zu ermöglichen, darf der Kettfaden im Zeitpunkt des Passierens nicht mit dem Spulenträger kollidieren.

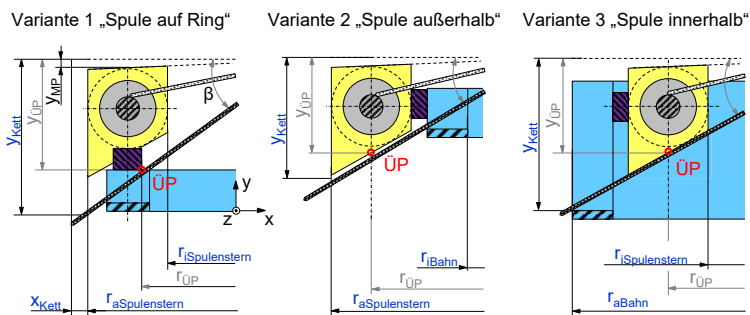


Bild 6.7: Variantenvergleich der Führung des Spulenträgers

Ausgehend von dieser Kollisionsbedingung wurde der Überwindungspunkt **ÜP** definiert, der unter Berücksichtigung des Strahlensatzes vom Flechtpunkt aus den minimal notwendigen Abstand zum Repräsentanten darstellt. Diese Bedingung gilt nur für einen quasi statischen Fall ohne Schwingformen des Kettfadens. Über den vertikalen Abstand  $y_{\text{ÜP}}$  und den jeweiligen Radius an diesem Punkt  $r_{\text{ÜP}}$ , konnte somit der Fadenabzugswinkel  $\beta$  und die Relativbewegung  $y_{\text{Kett}}$  berechnet werden (s. **Anlage 9.6**). Die Vergleichskriterien sind in der **Tabelle 6.1** aufgeführt und nach ihrer Priorität absteigend geordnet.

Tabelle 6.1: Variantenvergleich

Variante Vergleichs- parameter	Variante 1 Spule auf Bahn	Variante 2 Spule außerhalb	Variante 3 Spule innerhalb
Relativbewegung [mm]	227.568	<b>148.342</b>	177.108
innerster Radius [mm]	<b>490.818</b>	370.818	<b>490.818</b>
äußerster Radius [mm]	<b>618.818</b>	<b>618.818</b>	738.818

Der Variantenvergleich mit dem bekannten Mindestradius des Spulensterns  $r_{\text{Spulenstern}}$  als Bezugsgröße, ergab für Variante 2 die kleinste notwendige Relativbewegung. Der ebenfalls kleinste innere Radius relativiert sich in Hinblick auf die geometrischen Zusammenhänge. Eine Vergrößerung des inneren Radius führt lediglich zu einer Verkleinerung des Fadenabzugswinkels. Über die erneute Berechnung der genannten Abmessungen mit dem innersten Radius  $r_{\text{Spulenstern}}$  als Bezugsgröße wurde die getroffene Auswahl verifiziert. **Tabelle 6.2** zeigt die Verifikationsergebnisse und führt zur Auswahl von Variante 2.

Tabelle 6.2: Variantenvergleich mit gleichem Innenradius

Variante Vergleichs- parameter	Variante 1 Spule auf Bahn	Variante 2 Spule außerhalb	Variante 3 Spule innerhalb
Relativbewegung [mm]	227.568	<b>145.614</b>	177.108
innerster Radius [mm]	<b>490.818</b>	<b>490.818</b>	<b>490.818</b>
äußerster Radius [mm]	<b>618.818</b>	738.818	738.818

Als zentrales Transportelement zur Bewegungsübertragung und Lagesicherung des Spulenträgers musste der Schlitten im Spulenträgerrepräsentanten geometrisch berücksichtigt werden. Auch der Schlitten darf nicht mit dem Kettfaden kollidieren und muss demzufolge über seine elementaren Abmessungen, der Breite  $b_{\text{Schlitten}}$  und der Höhe  $h_{\text{Schlitten}}$ , in den schiefen Kegelstumpf integriert werden. Für die eindeutige Beschreibung der Zuordnung des Schlittens zur Gleitbahn, wurden die Breite des Schlittens  $b_{\text{Schlitten}}$  und die Parameter  $x_s$  sowie  $x_b$  (s. **Bild 6.8**) definiert. Die Gleitbahn selbst wurde über die Höhe  $h_{\text{Bahn}}$  und die Breite  $b_{\text{Bahn}}$  abgebildet und mit der entsprechenden Anzahl und Verteilung der Schlitze versehen. Die Tiefe eines Schlitzes richtet sich nach den Vorgaben einer zerstörungsfreien Fachbildung und wurde mit einem definierten Spiel über den Strahlensatz in die Geometrie der Gleitbahn projiziert.

$$x_b = \frac{x_s + b_{\text{Schlitten}}}{2} \quad (6.2)$$

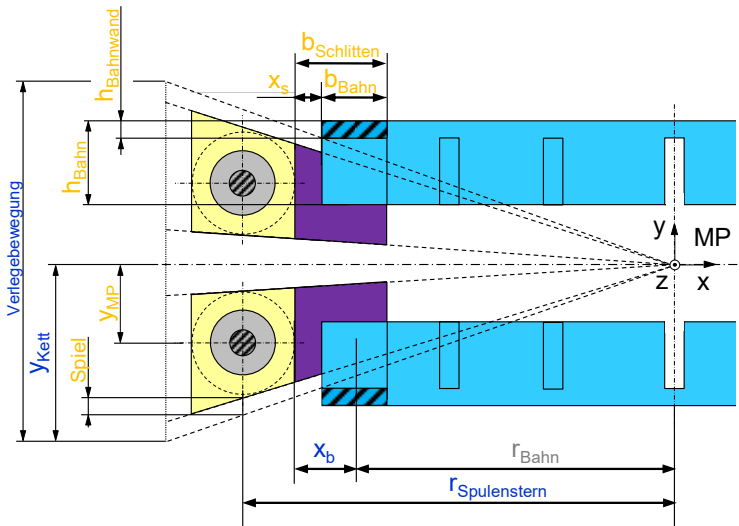


Bild 6.8: Schussfadensysteme nach Variante 2

### 6.2.2 Aufbau des Synthesemodells und Synchronisation

Das Synthesemodell zur Synchronisation der Verlegebewegungen (s. **Bild 6.9**) wurde auf Basis der definierten Aufbauskizzen und der grundlegenden kinematischen Vorgaben in *Creo 3.0®* umgesetzt. Der parametrische Aufbau erlaubte ein iteratives Vorgehen bei der Konkretisierung der Hauptbestandteile des Synthesemodells und demnach einen fließenden Übergang zur Entwurfskonstruktion. Die Abmessungen, der in Wechselwirkung stehenden Bauteile, mussten im Synthesemodell schrittweise angepasst und kinematisch synchronisiert werden. Beispielsweise hat eine Änderung des Radius der Gleitbahn neben der Veränderung der übrigen Radien auch eine Änderung des Spulenträgerrepräsentanten zur Folge. Demnach ändern sich auch die notwendige Schlitztiefe und die einhergehende Geometrie der Gleitbahn.

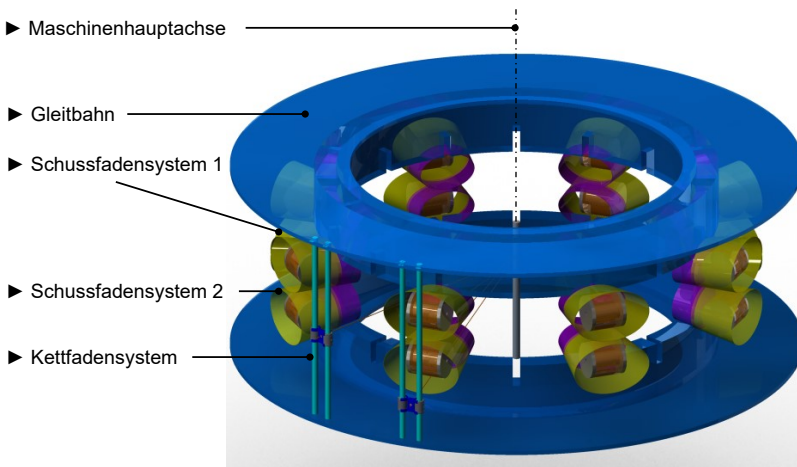


Bild 6.9: Synthesemodell zur Synchronisation der Verlegebewegungen

Zur Synchronisation und kontinuierlichen Verifikation der Verlegetechnik im Syntheseprozess wurde das Synthesemodell um eine kinematische Prozesssimulation, zur direkten Abbildung und Beurteilung der grundlegenden Prozessfunktionalitäten, erweitert. Um die variable Flechtfadenslänge im Verlauf der Verlegebewegung zu berücksichtigen, wurde jeder Flechtfaden aus drei

Stabelementen zusammengesetzt. Diese Stabelemente wurden mittels Gelenkdefinitionen vom Fadenabzugspunkt über den Flechtring bis hin zum Flechtpunkt, respektive der Tangentialbedingungen beim Ein- und Auslaufen an den Umlenkelementen, dem Flechtkern sowie bei der Ablage auf dem Kern, eingebaut. Parallelitätsbedingungen, um die Überlagerung des wechselförmigen Bewegungsverlaufs einer Gangbahn zu berücksichtigen, entfallen systembedingt. Aufgrund der gegengleichen Rotationsbewegung der Schussfadensysteme, in Verbindung mit dem kontinuierlich abgezogenen Flechtkern, ließ sich die Ablage der Schussfäden auf dem Flechtkern mit Hilfe von Tangentialbedingung idealisiert in Form von Flechtfadenpfaden beschreiben. Um Rechenzeit zu sparen, wurden Symmetrien verwendet und die minimal notwendige Anzahl an Flechtfäden zur Beurteilung der Verlegung eingesetzt.

Ziel der prozessorientierten Synthese war die Gestaltung einer zerstörungsfreien und kinematisch optimalen Kettfadenverlegung zur Vermeidung von Schwingungsanregungen der Kettfäden. Eine Abbildung der reibungsbehafteten Gleitvorgänge an den Kontaktstellen beim Zusammenziehen des Geflechts sowie bei der Ablage auf dem Flechtkern wurde demnach vernachlässigt. Ausgangspunkt für die Gestaltung der kinematisch optimalen Kettfadenverlegung war die grundlegende Synchronisation der Kettfadenverlegung mit der Schussfadenverlegung, um die direkte Kollision der Kettfäden mit den bewegten Spulenträgerrepräsentanten oder statischen Konstruktionselementen zu vermeiden. Entscheidende Voraussetzung der zerstörungsfreien Fachbildung war die exakte Synchronisation der gegengleichen Rotationsbewegung beider Schussfadensysteme und deren Positionierung bezüglich der Schlitze auf der jeweiligen Gleitbahn. Die Relativbewegung der Kettfäden zum Öffnen und Schließen eines Faches erfolgt in den Zeitfenstern, in denen die Schlitten möglichst symmetrisch zwischen zwei Schlitzen der jeweiligen Gleitbahn und symmetrisch zum gegenüberliegenden Schlitten ausgerichtet sind. Ziel dieser Synchronisationsaufgabe war die kinematische Beschreibung der technologiebedingten Bewegungsaufgabe in einem Bewegungsschaubild. Für die grundlegende Synchronisation der Kettfadenverlegung mit der Schussfadenverlegung wurden zunächst statische Positionsvorgaben, resultierend aus den in **Anlage 9.6** ermittelten Prozesspunkten, als Antrieb der Fadenstellg lie-

der in das Synthesemodell implementiert. Die gezielte Beeinflussung der Positionsvorgaben führte zum gezeigten Bewegungsschaubild für ein Fadenstellglied, **Bild 6.10**.

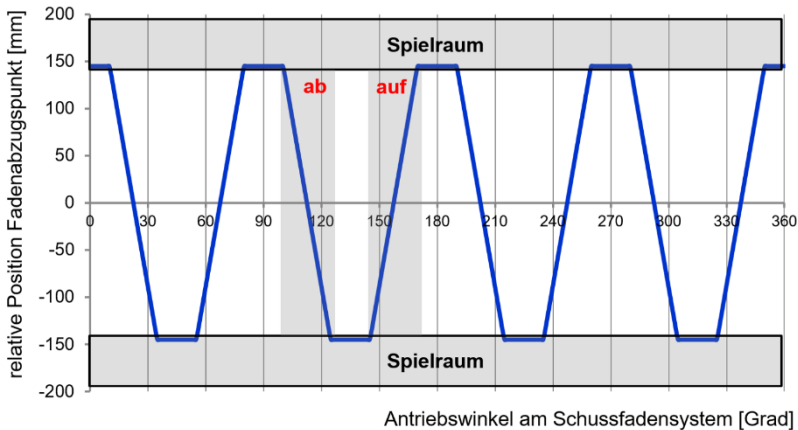


Bild 6.10: Bewegungsschaubild der synchronisierten Kettfadenverlegung

Aufgrund der gewählten Spulengröße weist der geforderte Hub-Zeitverlauf der translatorischen Relativbewegung des Fadenstellglieds, im Vergleich zum System „Kabelflechter“, ähnliche Anforderungen auf. Diese Anforderungen gehen aus den notwendigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwerten der geforderten Verlegebewegung hervor, die sich im Wesentlichen aus den Abmessungen der konventionellen Flechtspulen FSP 80/100/80 und FSP 98/100/80 bzw. den für beide Spulentypen geeigneten Spulenträgern, ergeben. Demnach setzt sich die notwendige Verlegebewegung aus vier Verlegezyklen für einen vollständigen Umlauf beider Schussfadensysteme zusammen. Der Absolutwert der Relativbewegung zur zerstörungsfreien Fachbildung ergibt sich, gemäß der ermittelten Relativbewegung  $y_{Kett}$ , zu ca. 300mm. In Verbindung mit der Verlegefrequenz, als Resultat einer vorgegebenen Flechtgeschwindigkeit, kristallisierten sich erste kinematische Anhaltspunkte für die Auswahl der mechanisch-zwangläufigen Getriebestruktur zum



Antrieb der Fadenstellglieder heraus. Das für die Synthese gewählte, 8-spulige Schussfadensystem führte zu einer, zur Ermittlung des Bedeckungsgrads, relevanten Anzahl von 16 Flechtfäden, und war dementsprechend auch mit dem in Kapitel 4.4.1 gewählten Beispiel bedingt vergleichbar. Unter Berücksichtigung aller getroffenen Einschränkungen sind demnach eine Antriebsdrehzahl von 37,5 U/min der Schussfadensysteme und die resultierende Verlegefrequenz von ca. 0,16 1/s notwendig, um eine mit den Radialflechtmaschinen vergleichbare Flechtleistung zu erzielen. Zur Realisierung dieser kinematischen Anforderungen muss darauf aufbauend Bewegungsdesign, in enger Verknüpfung mit der Maßsynthese einer mechanisch-zwangsläufigen Getriebestruktur zum Antrieb der Fadenstellglieder, betrieben werden.

Die Visualisierung der neuartigen Bindungsstruktur erfolgt über das Mapping der Flechtfadenpfade, die mit Hilfe der vorgegebenen Kinematik der Fadenabzugspunkte und des Flechtkerns als Raumkurve auf dem Flechtkern beschrieben wurde. Die Erfassung der Raumkurven erfolgte unter Vernachlässigung der Kreuzungs- und Bindungsstellen der Flechtfäden untereinander. Beim Aufdicken der Raumkurven musste diese Vereinfachung explizit berücksichtigt und der Fadenverlauf an den Bindungsstellen im Vorfeld bekannt sein oder logisch erschlossen werden. Eine quasi reale Abbildung des Flechtprozesses im Rotorflechtmaschinen System „D-3F“ ist in *Creo 3.0*® jedoch nicht möglich und müsste in einem gesonderten System modelliert werden. Wie im **Bild 6.11** beispielhaft gezeigt, wurden die Schussfäden in grün und orange, die Kettfäden in schwarz und weiß gekennzeichnet. Zur Visualisierung und Beurteilung der erfassten Raumkurven war es notwendig einen großen Kerndurchmesser, in Verbindung mit einem offenen Geflecht zu wählen. Eine geschlossene Produktcharakteristik ist unter realen Bedingungen über die Abstimmung der Konfigurationsparameter zu erzielen.

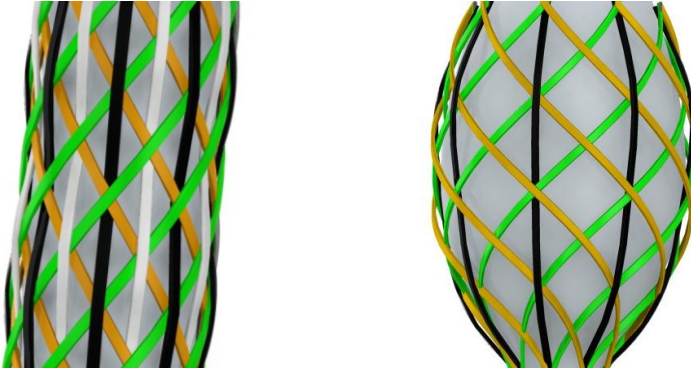


Bild 6.11: „D-3FG“ auf zylindrischem (links) & konvexem (rechts) Querschnitt

### 6.2.3 Entwurf des Antriebskonzepts

Ausgangspunkt für die Entwurfskonstruktion des neuartigen Antriebskonzepts zur Verifikation der zerstörungsfreien Flechtfadenverlegung und der physikalischen Machbarkeit war die, zur Realisierung der Verlegetechnik notwendige, Antriebstechnik. Diese Synthese erfolgte durch die Erweiterung des Synthesemodells in enger Verknüpfung mit der kinematischen Prozesssimulation. Dazu mussten die im Synthesemodell bereits abgebildeten Hauptbestandteile um die zur mechanisch-zwangsläufigen Bewegungsübertragung notwendigen Strukturen erweitert werden. Diese Erweiterung erfolgt durch die sukzessive Implementierung von materiellen Konstruktionselementen und deren iterativer Verfeinerung auf Basis kinematischer als auch kinetostatischer Analysen. Vor allem für die Verifikation der zerstörungsfreien Fadenverlegung und der kinematisch-optimalen Gestaltung sowie Synchronisation der Verlegebewegungen waren quasi reale Geometrien unerlässlich. Eine tatsächliche Auslegung und konstruktive Umsetzung eines kompakten und ringförmigen Antriebskonzepts der „**D-3F**“ war jedoch nicht Ziel der vorliegenden Arbeit. Die im Folgenden gezeigten Schritte zum Entwurf dieses Antriebskonzepts dienen dem grundsätzlichen Nachweis der Umsetzbarkeit des Schussfadensystems. Aus den Erfahrungswerten des ZIM-Kooperationsprojekts 2022605 ist die kon-

strukture Realisierung dieses Teilfunktionsträgers elementar und ausschlaggebend für die folgende Mechanismensynthese zur Entwicklung einer geeigneten Kettfadenverlegeeinrichtung.

Ausgehend von der Funktionsstruktur (s. Bild 6.2) der „**D-3F**“ wurde die Teilfunktion der Verlegung in realisierbare Module gegliedert. Ziel dieser Untergliederung war die sinnfällige Strukturierung der Hauptbestandteile nach der Bearbeitungspriorität und die Definition von Schnittstellen, um Teilbereiche der notwendigen Antriebstechnik isoliert betrachten zu können. In ihrer Wechselwirkung und Interaktion sind diese Module entscheidend für die Funktionalität der Verlegetechnik und beinhalten sowohl die wesentlichen kinematischen als auch die konstruktiven Anforderungen des gesamten Antriebskonzepts. Bereits der Aufbau des Synthesemodells orientierte sich am stark abstrahierten Schussfadensystem als logischer Startpunkt für die folgende Gestaltungsreihenfolge nach der „Top Down“ Methode:

- Schritt 1 ..... Gestaltung des Moduls „**Schlitten-Führung**“
- Schritt 2 ..... Gestaltung des Moduls „**Schlittenantrieb**“
- Schritt 3 ..... Gestaltung des Moduls „**Fadenstellglied-Führung**“
- Schritt 4 ..... Gestaltung des Moduls „**Antrieb Fadenstellglied**“

Für die Synthese des Schussfadensystems wurde das Gestell zunächst nur in Form der Gleitbahn berücksichtigt und in Abstimmung auf die geometrischen sowie kinematischen Gegebenheiten auf die gewählte Antriebstechnik schrittweise angepasst. Dem Gestell wird an der Schnittstelle von Schritt 2 zu Schritt 3 eine tragende Rolle zugeschrieben. Vor allem die Realisierung eines modularen Aufbaus muss im Zusammenspiel mit dem Gestell weitreichend berücksichtigt werden. Der tatsächliche Aufbau des Gestells sowie die Bereitstellung und Integration der motorischen Antriebstechnik wird demnach erst in der, zum Aufbau eines Prototyps notwendigen, Detaillierung konkret berücksichtigt. Zunächst standen die mechanischen Komponenten des Antriebskonzepts für die formschlüssige und schlupffreie Bewegungsübertragung sowie notwendiger, nichtlinearer Übersetzungen im Vordergrund.

Zur Gestaltung des Moduls „**Schlitten-Führung**“ wurde durch die Neukombination von Teilfunktionsträgern (vgl. Tabelle 4.3) eine konstruktive Abwandlung der bereits erprobten, wälzgelagerten Rollenbahnführung des Schussfadensystems favorisiert (vgl. [Emm12, III15]). Hinsichtlich der Verarbeitung von Verstärkungsfasern ist der nahezu schmiermittelfreie Transport der Spulenträger, in Kombination mit einer mechanisch-zwangläufigen Bewegungsübertragung, die einzig zielführende Variante. Die Vorteile der Rollenbahnführung liegen in der Trennung der Führungselemente durch Wälzkörper und dem geschlossenen Gelenkaufbau der als Gleitbahnersatz verwendeten Kurvenrollen, die den Transport der Spulenträger mit einer Minimalmengenschmierung der Kontaktstellen ermöglichen. Dazu sind die Spulenträger auf entsprechenden Schlitten befestigt, die über Führungsflächen fliegend, auf den als Gleitbahnersatz eingesetzten Kurvenrollenpaaren, gelagert sind.

Ein gekoppeltes Umlaufrädergetriebe zum mechanisch-zwangläufigen „Schlittenantrieb“ der beiden Schussfadensysteme ist, aufgrund der systembedingten Anordnung und dem ringförmigen Aufbau mit großer Durchgangsöffnung, nicht zielführend. Eine Verdopplung der relativen Drehzahl an den Führungsflächen findet demnach nicht statt. Die funktionsrelevante Anforderung eines definierten Abstands der Schlitten zueinander (mindestens eine Schlitzbreite von ca. 20 mm) ist auch im Antriebskonzept der neuartigen Rotorflechtmaschine auf die formschlüssige und schlupffreie Bewegungsübertragung, mit Hilfe eines getriebenen, segmentierten Zentralrades und treibenden Ritzeln, angewiesen. Besonderes Augenmerk musste bei dem gewählten Lösungskonzept auf die konstruktive Ausführung hinsichtlich des Gelenkaufbaus und der entsprechenden Form- und Lagetoleranzen gelegt werden.

Die als Zukaufteile verfügbaren Varianten für den Aufbau einer wälzgelagerten Rollenbahnführung sind Lauf-, Stütz- oder Kurvenrollen mit herstellerspezifischen Bezeichnungen. Vor allem die Kurvenrollen bieten dem Einsatzzweck entsprechende Eigenschaften, während Kugelumlauf- oder Rollenumlaufführungen aufgrund der geschlitzten Gleitbahn grundsätzlich ausscheiden. Die ausschlaggebenden Kriterien bei der Auswahl und Auslegung ergeben sich über die projektierte Kinematik des Antriebskonzepts in Verbindung mit den über die Spulen und Spulenträger vorgegebenen Masseparametern. Weitere relevante Punkte sind die Kontaktform und der Aufbau des Führungsgelenks, der Schmiermittelbedarf und die Lebensdauer, sowie die mögliche Krafteinleitung und Stützrichtung bei horizontaler oder vertikaler Anordnung

des gesamten Antriebskonzepts. Aus der gewählten „Variante 2“ eröffneten sich grundsätzlich zwei Anordnungsvarianten der Rollenbahnführung in Form der Anordnung der Rollen und des Schlittens. In beiden Varianten wurde die grundlegende Spulenposition, vertikal an der Außenseite der Gleitbahn, beibehalten, um den geometrischen Eingangsgrößen der „Variante 2“ zu entsprechen, **Bild 6.12**:

- **Variante 2A „vertikal“**: Die Hauptachsen der Kurvenrollen sind hinsichtlich der Maschinenhauptachse radial angeordnet. Damit verläuft die Rollenbahnführung vertikal an der Außenseite der Gleitbahn. Der Schlitten gleitet demnach ebenfalls vertikal an der Außenseite der Gleitbahn.
- **Variante 2B „horizontal“**: Die Hauptachsen der Kurvenrollen sind coaxial und kreisförmig um die Maschinenhauptachse angeordnet. Demnach ergibt sich die Rollenbahnführung horizontal auf der Gleitbahn und führt zu einer horizontalen Anordnung des Schlittens auf der Oberseite der Gleitbahn.

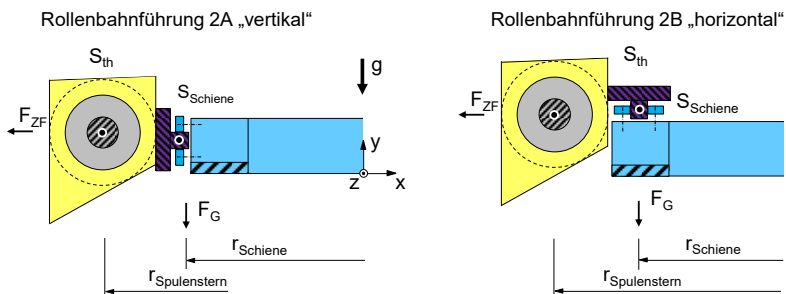


Bild 6.12: Variantenvergleich der Anordnung der Rollenbahnführung

Die gezeigten Varianten wurden bezüglich der angestrebten kompakten Bauweise und der Lastverteilung, in Hinblick auf die Führungsbahn analysiert. Dazu wurden die an der Führungsbahn und somit an den Kurvenrollen an-

greifenden Kräfte im stationären Betrieb, beim Hochfahren und beim Bremsvorgang, betrachtet. Mit der Spulengröße ist das maximal transportierbare Volumen des Flechtmaterials, der konstruktive Aufbau der Spulenträger, dessen Gesamtgewicht und Schwerpunkt im bestückten Zustand festgelegt. Über die Vorgabe der grundlegenden Kinematik des Schussfadensystems und einer realitätsnahen Gesamtmasse des bestückten Spulenträgers inklusive Schlitten und dessen Schwerpunktlage ergaben sich kinetostatische Randbedingungen. Dieses Vorgehen ist alternativlos zum Umsetzen eines Prototyps anzuwenden. Die Auswahl der Spulengröße und des Spulenträgers hängt entscheidend vom zu verarbeitenden Flechtmaterial, in Verbindung mit dem projektierten Einsatzgebiet, ab. Es ist davon auszugehen, dass für eine geplante Serienfertigung die maximal mögliche Spulengröße bei maximal möglicher Flechtleistung zum Tragen kommt. Ziel der Entwurfskonstruktion und eines möglichen Prototypen muss jedoch zunächst der Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität sein. Daher wurden im weiteren Verlauf realitätsnahe Parameter eingesetzt und über eine gewisse Bandbreite hinweg zur Berechnung herangezogen.

Beispielsweise ergibt sich die Fliehkraft  $\mathbf{F}_Z$  (s. **Bild 6.13**) in der xz-Ebene aus der Normalbeschleunigung  $\mathbf{a}_n$  und der theoretischen Bandbreite der Gesamtmasse  $\mathbf{m}_{th}$ :

$$F_{ZF} = -a_n * m_{th} \quad (6.3)$$

Die Normalbeschleunigung  $\mathbf{a}_n$  ergibt sich unter Berücksichtigung des Schwerpunktabstands zur Maschinenhauptachse  $\mathbf{r}_{sth}$  und dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{FF}$ :

$$a_n = -r_{sth} * \omega_{FF}^2 \quad (6.4)$$

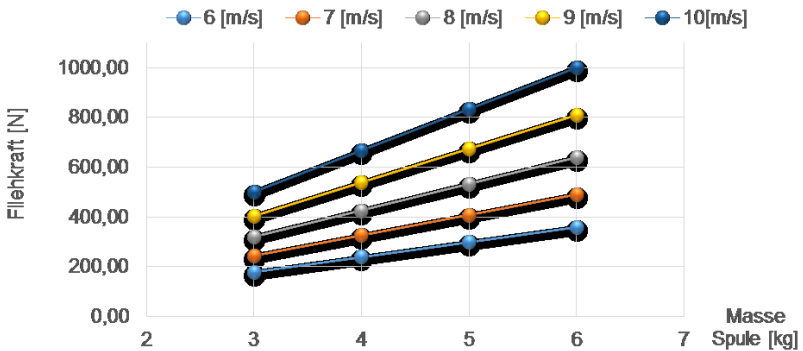


Bild 6.13: Fliehkraft abhängig von Masse und Geschwindigkeit (vgl. [III15])

Selbiges gilt auch für die Gewichtskraft  $F_G$ , resultierend aus der theoretischen Gesamtmasse sowie der Erdbeschleunigung. Die Richtung der Erdbeschleunigung ist für die jeweilige Anordnung des gesamten Antriebskonzepts in horizontaler oder vertikaler Ausrichtung gesondert zu berücksichtigen. Im Speziellen ist diese Ausrichtung für die Kontaktform und den Aufbau des Führungsgelenks entscheidend, um die Funktionalität der Führungsgelenks zu erhalten. Beispielsweise muss die Gewichtskraft, für die zur Synthese gewählte horizontale Anordnung des gesamten Antriebskonzepts (s. Bild 6.12), in Form einer Stützkraft, berücksichtigt werden. Diese Stützkraft wirkt axial zur Hauptachse der Kurvenrollen und darf nicht zu einer Beeinträchtigung der Rollenlebensdauer oder zum Systemversagen führen. Weiterhin ist, aufgrund der asymmetrischen Lastverteilung hinsichtlich der Führungsbahn mit einem Stützmoment um die z-Achse der Bahn zu rechnen. Für den stationären Betrieb ist die Gewichtskraft von geringer Bedeutung, da im geforderten Drehzahlbereich die Fliehkraft dominiert. Die Variante der Rollenbahnführung 2A „vertikal“ müsste die dominierende Fliehkraft im stationären Betrieb kontinuierlich über die axiale Traglast der Kurvenrollen abstützen. Diese Einsatzbedingungen sind für derartige Kurvenrollen jedoch nicht vorgesehen und demnach konstruktiv nicht zu empfehlen. Die Rollenbahnführung 2A „vertikal“ scheidet dementsprechend aus.

Im Zuge der Anordnung der Rollen und des Schlittens musste auch der Gelenkaufbau zur Kreisbahnführung des Schlittens gestaltet werden. Wie bereits im Kapitel 4.3 beschrieben, muss der Zeitpunkt des Überquerens gesondert

analysiert werden. Im Gegensatz zur hydrodynamischen Gleitführung mit durchgängigem Flächenkontakt, führt der gewählte Gelenkaufbau der Rollenbahnführung zu einer kontinuierlich wechselnden Anzahl an Kontaktstellen beim Durchlaufen der Rollenbahn und nicht nur beim Überqueren der Schlitze. Der gewählte Gelenkaufbau stützt sich auf die äquidistante Verteilung von Kurvenrollenpaaren auf der Gleitbahn. Die Drehachsen der beiden Kurvenrollen eines Kurvenrollenpaares wurden coaxial hinsichtlich der Maschinenhauptachse und auf einer Normalen zur Maschinenhauptachse angeordnet. Der Schlitten steht über ein konturadaptives Gegenstück (Schwert) im Wälzkontakt zwischen den Kurvenrollenpaaren. Grundsätzlich war bei der äquidistanten Verteilung, in Verbindung mit dem notwendigen Rollendurchmesser, darauf zu achten, dass immer mindestens zwei Kurvenrollenpaare notwendig sind, um die Führung des Schwerts mit einem kontinuierlichen Aufbau des Führungsgelenks sicher zu stellen. Um beim Überqueren von Kurvenrollenpaar zu Kurvenrollenpaar die Auswirkungen von dynamischen Effekten oder dem Verkanten des Schlittens zu minimieren, musste jedoch die Anzahl an Kontaktstellen so groß als möglich eingestellt werden. Die Geometrie des Schwerts musste demnach kreisbogenförmig und unter geometrischer Berücksichtigung der Verteilung derart gestaltet werden, dass mindestens zwei Kurvenrollenpaare den Aufbau des Führungsgelenks sicherstellen. Vor allem in Hinblick auf die zu erwartende Laufruhe wurden der Grad der Überbestimmungen  $\ddot{u}$  des Gelenkaufbaus und die notwendigen Form- und Lage-toleranzen als Beurteilungskriterium herangezogen.

Ähnlich dem Einsatz in Kurvengetrieben wird für den Aufbau eines Prototyps der Einsatz von balligen Kurvenrollen angestrebt. Um die Ausprägung eines Wälzkontakts über das konturadaptive Schwert zu begünstigen, kann ein Einlaufprozess durchgeführt werden. Bei den vorgeschlagenen Lösungsansätzen handelt es sich um konstruktiv zu berücksichtigende Maßnahmen, die in der Entwurfskonstruktion weiterführend zu detaillieren und analysieren sind. Ein weiterer kritischer Punkt ist das Verhältnis der Durchmesser der Kurvenrollen und des im Wälzkontakt stehenden Schwerts als Element des Schlittens. Bei idealem Wälzkontakt führen kleine Rollendurchmesser zu hohen Drehzahlen der Kurvenrollen und einer resultierenden thermischen Belastung sowie der einhergehenden Beeinträchtigung der Lebensdauer.

Neben der Erweiterung des Schlittens als Trägereinheit des Spulenträgers um das Schwert als Gegenstück des Führungsgelenks, musste im Hinblick auf



das Modul „**Schlittenantrieb**“ ein Anschlusselement zur Befestigung der Zahnradsegmente des Zentralrads vorgesehen werden. Zur Synthese des Schlittenantriebs gab es wiederum verschiedene Möglichkeiten zur gegenseitigen Anordnung des segmentierten Zentralrads und der treibenden Ritzel. Aufgrund der Lastverteilung im Wälzkontakt der Stirnradpaarung wurde zur weiteren Konkretisierung die Variante 2Ba „außen“ gewählt. Eine Kegelradpaarung ist prinzipiell möglich und im Entwurfsstadium mit der Stirnradpaarung zu vergleichen. Im folgenden **Bild 6.14** werden die beiden plausiblen Zuordnungen für die Anwendung einer Stirnradpaarung dargestellt:

- **Variante 2Ba „außen“:** außenverzahntes Zentralrad;  
innenliegende Anschlussplatte
- **Variante 2Bb „innen“:** innenverzahntes Zentralrad;  
außenliegende Anschlussplatte

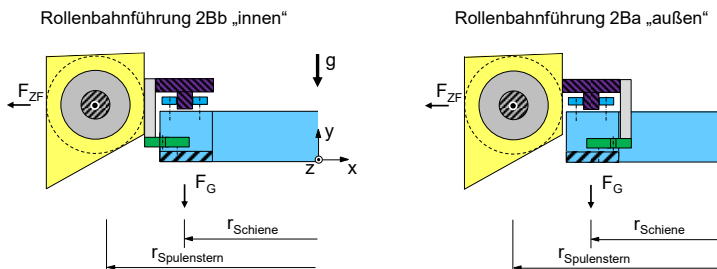


Bild 6.14: Varianten der Stirnradpaarung

Wie eingangs bereits thematisiert, wurde das Gestell zunächst ausschließlich in Form der Gleitbahn berücksichtigt. Dieses konstruktive sowie antriebstechnische Bindeglied der Schuss- und Kettfadenverlegung muss in erster Linie auf die geometrischen als auch kinematischen Gegebenheiten abgestimmt werden. Der konstruktive Aufbau des Gestells resultiert aus den Anforderungen an die Steifigkeit des Gesamtsystems und den geometrischen Gegebenheiten des Antriebskonzepts als auch der Flechtfadenverlegung. Für den An-

trieb der neuartigen Rotorflechtmaschine kommt nach sorgfältiger Betrachtung aller Lösungsvarianten nur die elektronisch gesteuerte Servoantriebstechnik, zur Bereitstellung einer rotierenden Antriebsbewegung, in Frage. Vorzugsweise sind für große Durchmesser synchronisierbare Einheiten zu wählen, da eine Rückführung auf einen Antrieb, aufgrund der ringförmigen Bauweise, nicht zweckmäßig erscheint. Entscheidend für die Auswahl ist jedoch die Ermittlung der notwendigen Leistungsparameter. Der Entwurf der Anlage ist dementsprechend weit voran zu treiben, um, mit Hilfe von Masseparametern, eine sinnfällige Abschätzung für die tatsächlich einzusetzende Antriebslösung und die Dimensionierung des Gestells treffen zu können.

Eine wesentliche Aufgabe dabei ist die Realisierung eines modularen und durchmesseradaptierbaren Gesamtaufbaus unter dem Aspekt der form-schlüssigen und schlupffreien Bewegungsübertragung. Dazu wurde im Entwurf die ebenfalls ringförmige Anordnung eines Umlaufrädergetriebes gewählt. Diese Form der Bewegungsübertragung kommt in beiden analysierten Flechtsystemen und vor allem bereits im Radialflechter (Stirnräder benachbarter Flügelräder stehen im Eingriff, vgl. Kapitel 3.2.1) mit großen Durchmessern erfolgreich zum Einsatz. Das Antriebskonzept des Gangbahn-Flügelrad Systems ist jedoch nicht direkt adaptierbar. Aufgrund des konstanten Drehsinns kann für den eigentlichen Schlittenantrieb nur die Abtriebsbewegung jedes zweiten Zahnrades herangezogen werden (vgl. **Bild 6.14**). Demnach steht jedes zweite Zahnrad über eine starre Verbindung direkt im Eingriff mit dem segmentierten Zentralrad am Schlitten. Bereits das im Rahmen des ZIM-Kooperationsprojekts 2022605 entstandene Lösungskonzept zeigte, dass derartige Varianten unter Berücksichtigung der vorherrschenden technologischen und kinematischen Aspekte sowie mit den Auslegungskriterien nach dem Stand der technischen Lehre bereichsweise modularisierbar sind.

In Erweiterung des Lösungsansatzes erschließt sich, wiederum in Hinblick auf einen durchmesseradaptierbaren Gesamtaufbau, die notwendige Gestaltung des Moduls „**Fadenstellglied-Führung**“. Bereits im Kapitel 6.1.2 wurde der Zusammenhang des Durchmessers des ringförmigen Antriebskonzepts bei gleicher Spulengröße und der Relativbewegung  $y_{\text{Kett}}$  ergründet und über den Strahlensatz als Auslegungsparameter beschrieben. Für den grundsätzlichen Aufbau wurde wiederum in Anlehnung an das ZIM-Kooperationsprojekt 2022605 eine Zwei-Säulenführung mit einem zylindrischen Gelenkaufbau gewählt. Zur Beurteilung und Einschätzung der zu erwartende Laufruhe und

Schwingungsaufprägungen wurden auch bei dieser Anwendung im ersten Schritt der Grad der Überbestimmungen  $\ddot{u}$  des Gelenkaufbaus als erstes Kriterium zur Bewertung der Führungseigenschaften herangezogen. Mögliche Varianten zur Optimierung und konstruktiven Gestaltung wurden bereits von A. Meinel [Mei12] untersucht. Demnach wurde beispielsweise der Einsatz von schmiermittelfreien Gleithülsen am Fadenstellglied mit einem gewichtsoptimalen Aufbau des Fadenstellglieds kombiniert. Das Fadenstellglied ist aufgrund der einfachen Aufgabe der Fadenführung nur mit einem Fadenumlenkelement ausgerüstet und konnte dementsprechend optimiert werden. Mechanisch-passive Kompensationseinrichtungen zur Regulierung der Faden-spannung entfallen systembedingt.

Der gewichtsoptimale Aufbau des Fadenstellglieds erfolgte in enger Verknüpfung mit der Struktur- und Maßsynthese des Moduls „**Antrieb Fadenstellglied**“. Zur optimalen Kettfadenverlegung mit hochdynamischen Anforderungen wurde zum Antrieb des geführten Fadenstellglieds zunächst eine mechanisch-zwangsläufige Getriebestruktur favorisiert. In Erweiterung der Synchronisation der Kettfadenverlegung mit der Schussfadenverlegung wurde zur Synthese die inverse kinematische Analyse (vgl. [Mat02]) herangezogen. Aus dem gezeigten Bewegungsschaubild (s. Bild 6.10) wurde eine kinematisch-optimale Übertragungsfunktion zur Verlegung des Kettfadens, durch die iterative Analyse der zerstörungsfreien Fachbildung, verifiziert. Diese Verlegebewegung ist mit Hilfe eines, durch die inverse Analyse zu synthetisierenden, nichtlinear übersetzenden Getriebes bereit zu stellen. Um die nichtlineare Übersetzung der rotierenden Antriebsbewegung möglichst ohne Abweichung bezüglich der ermittelten Übertragungsfunktion zu realisieren und komplexe Koppelgetriebestrukturen zu vermeiden, wurde zunächst der Einsatz eines Kurvengetriebes in Betracht gezogen. Der Einsatz einer Kurvengetriebestruktur in jeder möglichen Form eignet sich für das flexible Bewegungsdesign. Auch bei der Analysierten Hebeflechtmaschine stellte sich heraus, dass nicht die tatsächliche Mechanik, sondern die Schwingungsaufprägungen als Resultat des Fadenhebels zur Leistungsbeschränkung führten.

Beispielsweise bietet ein Kurvengetriebe mit Stößel beste Voraussetzungen zum gezielten Bewegungsdesign der Verlegebewegung des Fadenstellglieds (Stößel) und zur gezielten Beeinflussung von Schwingungsaufprägungen. Mit Hilfe von Fourier-Reihen könnte die Übertragungsfunktion schwingungsoptimal auf das Gesamtsystem ausgelegt werden. Diese schwingungsoptimale

Auslegung berücksichtigt unter anderem das Drehzahlspektrum und die Eigenfrequenz der Struktur. Vor allem die Eigenfrequenz der Struktur kann in diesem frühen Entwicklungsstadium nicht als bekannt vorausgesetzt werden. Diese und weitere Aufgaben sind zur Realisierung eines realen Prototyps auf Basis der gezeigten Entwurfskonstruktion (s. **Bild 6.15**) im Konstruktionsprozess zu bewältigen und in der Zielsetzung der Arbeit nicht enthalten.

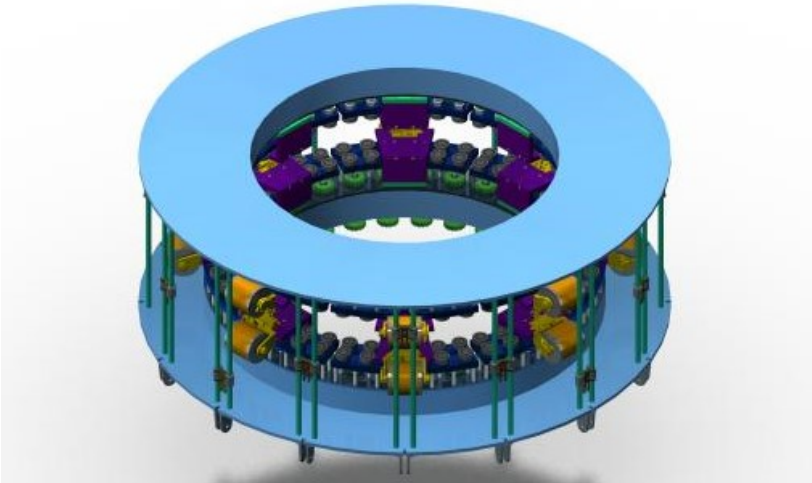


Bild 6.15: Entwurfskonstruktion der „D-3F“

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Innovationsprozess der textilen Prozesskette von Faserverbundbauteilen für Leichtbauanwendungen ist ein weitreichendes und interdisziplinär vernetztes Forschungs- und Entwicklungsfeld. Eine wesentliche Aufgabe ist die Überführung der stark von den technologischen Aspekten der Produktentwicklung geprägten Maßnahmen, in serienreife Anwendungen. Bei der Serienfertigung von FV-Bauteilen steht die belastungsgerechte und zugleich geometrisch-flexible Gestaltung von textilen Halbzeugen oder Preforms mit gleichbleibender Produktqualität und Verstärkungseigenschaften im Vordergrund. Aufgrund des spezialisierten Einsatzes sind diese Textilprodukte an umfangreiche technologische Produktvorgaben gebunden, die hinsichtlich der notwendigen kraftflussgerechten Orientierung sowie der schädigungsarmen Handhabung der Verstärkungsfasern, berücksichtigt werden müssen. Demnach wird die Entwicklung von automatisierten Fertigungsprozessen meist im Anschluss an die tatsächliche Produktgestaltung initiiert. Bei der Umsetzung der genannten Vorgaben in automatisierten Fertigungsprozessen stoßen Konstrukteure mit den klassischen Werkzeugen der Mechanismensynthese und der Konstruktionsmethodik oftmals an die Grenzen des antriebstechnisch und konstruktiv Realisierbaren. Grund dafür ist die meist strikte Orientierung an herkömmlichen Bindungsstrukturen und konventioneller Maschinentechnik. Auch der ganzheitliche Ansatz der Getriebeauslegung kann mit starr vorgegebenen technologischen Anforderungen in der Regel nur zu einem subjektiv optimalen Ergebnis führen. Vor allem durch die konsequente Orientierung an bestehenden Fertigungsverfahren und bekannten Bindungsstrukturen eröffnet sich daher ein vergleichsweise geringer Inventionsgrad.

Insbesondere das Flechtverfahren bietet hervorragende Voraussetzungen zur faserschonenden Verarbeitung von Kohlenstoff- bzw. Verstärkungsfasern und auch zur wirtschaftlichen Serienfertigung von belastungsgerechten Halbzeugen oder endkonturnahen Preforms. Durch das schichtweise Überflechten von formgebenden Flechtkernen wird die verhältnismäßig hohe Faserablagerrate der Flechttechnik mit einem gleichzeitig großen Fertigungsrepertoire zur geometrisch-flexiblen Gestaltung ideal kombiniert. Besonders die gewebeartige Bindungsstruktur des Flechtmaterials führt zu einzigartigen strukturmekanischen Eigenschaften mit hoher Schadenstoleranz. Zur Realisierung einer reproduzierbaren und kraftflussgerechten Faserorientierung werden

meist drei Fadensysteme zu einem triaxialen Geflecht verarbeitet. Kern der konventionellen Fertigungsprozesse sind Rund- oder Radialflechtmaschinen, basierend auf dem Gangbahn-Flügelrad System, mit mechanisch-zwangsläufiger Flechtfadenverlegung und gestellfestem Flechtbett. Rotorflechtmaschinen - besonders Hebelflechtmaschinen nach dem System „Horn“ - kommen hierbei allerdings nicht zum Einsatz. Die vielversprechenden Vorteile des Systems „Horn“ gegenüber dem Gangbahn-Flügelrad System liegen jedoch in der abzugsideal und ausrichtungskonstanten Spulenanordnung in Verbindung mit der charakteristischen Flechtfadenverlegung sowie der damit einhergehenden faserschonenden und lageparallelen Verarbeitung des Flechtmaterials. Gleichzeitig ist die gesteigerte Flechtgeschwindigkeit, aufgrund des Maschinenkonzepts mit gegengleicher Rotationsbewegung zweier Rotoren, für eine wirtschaftliche Serienfertigung von enormem Vorteil.

Daraus leitete sich die Zielstellung ab, das Potential des Systems „Horn“ zur Herstellung von Halbzeugen oder Preforms durch Überflechten in einem ringförmigen Antriebskonzept mit großer Durchgangsöffnung zu erschließen. Von den zunächst starr vorgegebenen technologischen Produktvorgaben und Anforderungen einer triaxialen Flechtstruktur ausgehend, bestand die Herausforderung in der Integration eines dritten Fadensystems in eine faserschonende und antriebstechnisch umsetzbare Verlegetechnik. Schon bei der Adaptierung der konventionellen Antriebslösung durch die partielle Optimierung im System „Kabelflechter“ zeigten sich konzeptbedingte Einschränkungen mit entscheidender Bedeutung für die technologischen Anforderungen an das Überflechten von formgebenden Kernen zur Preformherstellung. Die zum Überflechten mit multiaxialer Abzugsbewegung notwendige große Durchgangsöffnung in einer ringförmigen Flechtvorrichtung erschien mit dem gewählten Antriebskonzept nicht Erfolg versprechend. Vor allem aber die bekannten Möglichkeiten zur Integration eines dritten Fadensystems in Form von Stehfäden konnte allein durch die Adaptierung des Antriebskonzepts nicht zielführend gelöst werden.

Diese genannten Schwachstellen und die konzeptbedingten Einschränkungen des Systems „Kabelflechter“ zeigten die Notwendigkeit den Innovationsprozess, um die Gestaltung zweckoptimaler Textilprodukte durch die direkte Berücksichtigung der antriebstechnischen Realisierung zu erweitern. In logischer Konsequenz wurde am Beispiel der neuartigen Verlegetechnik „**D-3F**“

die prozessorientierte Synthesemethodik auf Basis einer Technologiesynthese erarbeitet, und in den ganzheitlichen Ansatz der Getriebesynthese integriert. Dieser Syntheseprozess erfolgt durch die Kombination der getriebe-technisch optimalen und der technologisch notwendigen Anforderungen. Ausgangspunkt dieser Methodik waren die starren Produktvorgaben der triaxialen Flechtstruktur. Um gestalterischen Freiraum für die Technologiesynthese zu gewinnen, musste diese Bindungsstruktur aufgelockert und hinsichtlich deren Verstärkungs- und Drapierungscharakteristik im FV-Bauteil analysiert werden. Diese Herangehensweise kann als strukturierter Erfindungsprozess für neuartige, alternative Produkte mit äquivalenten oder zweckoptimalen Eigenschaften unter direkter Berücksichtigung der antriebstechnischen Leistungsfähigkeit betrachtet werden. Demnach kann diese Methodik nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn ein Auflockern von Vorgaben nachvollziehbar und zulässig ist. Allerdings ist diese Verfahrensweise nicht universell einsetzbar und führt nicht zwangsläufig zu einem neuartigen oder verbesserten Produkt. Vor allem aber für Innovationsprozesse lohnt sich der Einsatz der vorgeschlagenen Methodik.

Ausgangspunkt der Technologiesynthese war im vorliegenden Beispiel die grundlegende Studie und Bedarfsanalyse der textilen Prozesskette zur Herstellung von FV-Bauteilen mit reproduzierbarer und kraftflussgerechter Orientierung der Verstärkungsfasern in endkonturnahen Halbzeugen. Weitere Anhaltspunkte lieferte die freie Betrachtung aller Voraussetzungen zur wirtschaftlichen Serienfertigung von belastungsgerechten Preforms durch das schichtweise Überflechten formgebender Kerne. Mit der qualitativen und kinematischen Analyse der zum Überflechten geeigneten Flechtsysteme konnten sowohl wichtige antriebstechnische als auch konstruktive Parameter isoliert und ein Ideenspeicher sowie die notwendige Bewertungskompetenz erarbeitet werden. Diese Herangehensweise ging mit dem Auflösen der kinematischen, strukturellen und konstruktiven Vorgaben der bekannten Flechtsysteme und der zielgerichteten Neukombination von erforderlichen Teilfunktionen zur Herstellung der neuartigen Bindungsstruktur einher. Dabei galt es die gewonnenen Erfahrungen und die geeigneten Ergebnisse des Systems „Kabelflechter“ im Syntheseprozess zweckoptimal zu integrieren. Die prozessorientierte Synthese zur Synchronisation der Verlegebewegung unter direkter Beurteilung der antriebstechnischen Machbarkeit, mit Hilfe der Prozesssimulation zur direkten Verifikation der Verletechnik, führte letztlich

zum neuen Antriebskonzept für die Rotorflechtmaschine „**D-3F**“ und dem einhergehenden textiltechnologischen Fertigungsverfahren mit einer neuen geweartigen Bindungsstruktur als Kombination aus Gelege und Geflecht bzw. Gewebe: „**D-3FG**“. Die Prozesssimulation kann mit Hilfe von Versuchsergebnissen und Messwerten weiter vorangetrieben und durch einen realen Prototyp der Rotorflechtmaschine verifiziert werden. Demnach kann die neue Bindungsstruktur frühzeitig in den Auslegungsprozess von FV-Bauteilen integriert und numerisch berücksichtigt werden.

Zwar kann anhand des vorliegenden Ergebnisses ein neuartiges und alternatives Textilprodukt unter direkter Berücksichtigung der antriebstechnischen Leistungsfähigkeit angeboten werden, doch gilt es, das Potential der neuen Bindungsstruktur sowie des zugehörige Antriebskonzepts mit Spezialisten kontrovers zu Diskutieren. Die grundsätzliche Befähigung um technologische Anforderungen zu hinterfragen ist zu diesem Zwecke nicht alleine ausschlaggebend. Für eine weitreichende Validierung, muss unter konsequenter Fortführung der prozessorientierten Synthesemethodik eine Rotorflechtmaschine, basierend auf der neuartigen Verlegetechnik „**D-3F**“, entwickelt und das „**D-3FGeflecht**“ gefertigt und erforscht werden. Dieses Vorhaben ist Aufgrund der Vielzahl an aufgeworfenen und zu berücksichtigenden Themengebieten nur im Verbund mit spezialisierten Partnern durchführbar.



## 8 Literaturverzeichnis

### 8.1 Schriften und Bücher

- [Akk06] AKKERMAN, R.; VILLA RODRIGUEZ, B. H.: *Braiding Simulation for RTM Preforms - in Proceedings*. TEXCOMP8, Nottingham 2006
- [Arg79] ARBEITGEBERKREIS GESAMTTEXTIL: *Textiltechnik – Herstellverfahren und Verwendungsarten textiler Flächen*. Deutscher Fachverlag, Frankfurt 1979
- [AVK14] AVK-INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE: *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4.Aufl. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden 2014 – ISBN 978-3-658-02754-4
- [Bau99] BAUMBACH H.: *SSB – Experten für Flechten und Spiralisieren*. Spirkka Schnelflechter, Wilhelminenhofstrasse 76-77, Berlin 1999
- [Bec14] BECK, T.; SCHRATZ, M.; GRIES, T.: *Oberflächenmerkmale von Fadenführungselementen und deren Einfluss auf das Verarbeitungsverhalten von Carbonfasergarnen*. 14. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-05-14, S. 9-16  
- ISBN 978-3-9812554-9-2
- [Ber97] BERGER, M.: *Ein Beitrag zur Manipulation von Bahnkurven ebener servoangetriebener Koppelgetriebe*. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8, Nr. 604, Düsseldorf 1997 - ISBN 3-18-360408-6
- [Ber05] BERGER, M.; MATTHES, J.: *Toolbox zur effizienten Lösung antriebs- und getriebetechnischer Aufgabenstellungen mit Mathcad*. 6. Kolloquium Getriebetechnik, Verlagshaus Mainz, Aachen 2005, S.193-208
- [Ber06] BERGER, M.; MATTHES, J.: *MATTOOL – Eine Sammlung modularer Algorithmen zur rechnerunterstützten Antriebs- und Getriebeauslegung*. VDI Berichte Nr. 1966 (2006), S. 403-421  
- ISBN 3-18-091966-3

- [Ber08] BERGER, M.; Jakel R.: *Ganzheitliche Getriebeauslegung*. 8. Anwendertreffen Simulation PTC World 2008, Darmstadt 2008
- [Bee86] BEYREUTHER, R.: *Dynamik von Fadenbildungs- und Fadenverarbeitungsprozessen*. 1.Aufl. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1986 - ISBN 3-343-0093-0
- [Bey31] BEYER, R.: *Technische Kinematik*. Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1931
- [Bir13] BIRKEFELD, K.: *Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten*. Dissertation, Universität Stuttgart - Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Stuttgart 2013
- [Boe12] BOETTCHER, J.: *Systematik, Analyse und Simulation von Webmaschinen und der Technologie des Webens*. Studienarbeit (unveröffentlicht) Technische Universität Chemnitz - Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2012
- [Bra13] BRANSCOMB, D.; BEALE, D.; BROUGHTON, R.: *New Directions in Braiding*. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2013 - Band8
- [Bue93] BÜSGEN, W. A.: *Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen*. Dissertation, RWTH Aachen - Fakultät für Maschinenwesen, Aachen 1993
- [Cec11] CECCARELLI, M.: *Technology Developments: the Role of Mechanism and Machine Science and IFToMM*. Mechanisms and Machine Science: Ausgabe 1. Springer-Verlag, Heidelberg/ Dordrecht/ London/ New York 2011 – ISBN 978-94-007-1300-0
- [Che11] CHERIF, C.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau - Techniken - Verfahren - Materialien – Eigenschaften*. 1. Aufl. Springer-Verlag, Heidelberg/ Dordrecht/ London/ New York 2011 - ISBN 978-3-642-17991-4

- [Che12] CHERIF, C.; KROLL, L.: *Entwicklung großserientauglicher Fertigungstechnologien für komplexe Faserkunststoffverbundbauteile*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 17-28 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Chr12] CHRIST, M.; et al: *Prüfverfahren und Methoden zur Charakterisierung der Drapierbarkeit von technischen Textilien*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 250-257 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Den12a] DENNINGER, D.; BERGER, M.; HEINE, A.: *Strukturvergleich und Maßsynthese nichtlinearer Antriebskonzepte zur Erzeugung von Raumkurven für Flechtmaschinen - Ganzheitliche Getriebeauslegung am Beispiel einer Schnellrundflechtmaschine nach dem Maschinensystem Horn*. 16. VDI Getriebetagung Bewegungstechnik, Nürtingen 2012
- [Den12b] DENNINGER, D.; et al: *Methoden zur Simulation und Analyse räumlicher Kurvengetriebe am Beispiel der Kettfadenverlegung einer Hebelflechtmaschine*. 22. Internationale Wissenschaftliche Konferenz, Mittweida 2012 - ISSN 1437-7624
- [Den13a] DENNINGER, D.; et al: *Simulation und Analyse zur Ermittlung kinematischer Parameter für die CAE-gestützte Mechanismensynthese*. 5. Saxon Simulation Meeting, Chemnitz 2013
- [Den14] DENNINGER, D.; BERGER, M.: *Mechanischer Fadenlängenausgleich zur optimalen Handhabung von Flechtmaterialien*. 14. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2014-05-14, S. 39-46 – ISBN 978-3-9812554-9-2
- [Dou64] DOUGLASS, W. A.: *Braiding and Braiding Machinery*. Cleaver-Hume-Press Ltd., London 1964
- [Dre12] DRESIG, H.; HOLZWEIßIG, F.: *Maschinendynamik*. 11.Aufl. Springer-Verlag, Berlin 2012 – ISBN 978-3-642-29571-3

- [Dre13] DRECHSEL, J.: *Entwicklung und Umsetzung eines universellen mechatronischen Gesamtkonzeptes zum Fadenwechsel in Großrundstrickmaschinen*. Diplomarbeit (unveröffentlicht) Technische Universität Chemnitz – Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2013
- [Ehr06] EHRENSTEIN, G. W.: *Faserverbund-Kunststoffe – Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften*. 2.Aufl. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München/Wien 2006 - ISBN 978-3-446-22716-3
- [Eng94] ENGELS, H.: *Handbuch der Schmaltextilien: die Flechttechnologie. Maschinen und Verfahren zur Erzeugung konventioneller Geflechte, Teil 1*. FB Textil- und Bekleidungstechnik, Fachhochschule Niederrhein, 1994
- [Erb09] ERBER A.; BIRKEFELD K.; DRECHSLER K.: *The Influence of Braiding Configuration on Damage Tolerance of Drive Shafts*. SEICO 09, Paris 2009
- [Erm07] ERMANNI P.: *Composites Technologien*. Version 4.0. Vorlesung Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich 2007
- [Fel13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Springer Verlag, Berlin 2013 - ISBN 978-3-642-29568-3
- [Fin04] FINCKH, H.: *Numerische Simulation der mechanischen Eigenschaften textiler Flächengebilde- Gewebeherstellung*. DYNAMORE LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 2004
- [Goe00] GÖTZ, K.: *Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde*. Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 2000
- [Gra12] GRAVE, G.; HORN, J.: *Flexible und reproduzierbare Preformherstellung mittels Flechttechnik*. 13. Chemnitzer Textiltechnik Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S.281-288 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Gri07] GRIES, T.; KLOPP, K.: *Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien - Verfahren und Anwendungen*. 1.Aufl. Springer Verlag, Berlin 2007 - ISBN 978-3-540-37227-1

- [Gri14] GRIES, T.; VEIT, D.; WULFHORST, B.: *Textile Fertigungsverfahren – Eine Einführung*. 2. Aufl. Hanser, München 2014 - ISBN 978-3-446-43218-5
- [Hag09] HAGEDORN, L.; THONFELD, W.; RANKERS, A.: *Konstruktive Getriebelehre*. 6.Aufl. Springer Verlag, Heidelberg/ Dordrecht/ London/ New York 2009 - ISBN 978-3642016134
- [Han12] HANKE, U.; et al.: *Anwendung von Führungsgetrieben zur Lösung rotationssymmetrischer Führungsaufgaben im textilen Fertigungsprozess von Hochleistungsbauteilen*. 16. VDI Getriebetaugung Bewegungstechnik, Nürtingen 2012
- [Hei10] HEINE, A.; et al.: *MOCAD - Ein grafisch interaktives Werkzeug zur Berechnung und Optimierung von Kurvengetrieben und Motion Control Systemen*. VDI Berichte 2116, VDI Verlag. Düsseldorf 2010 - ISBN 978-3-18-092116-7
- [Hei15] HEINE, A.: *Ein Beitrag zur kennwertorientierten Entwicklung kurvengesteuerter, ebener Schrittgetriebe*. Dissertation Universität Chemnitz – Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2015 - ISBN 978-3-944640-51-8
- [Her10] HEROLD, M.: *Analyse und Simulation einer Linearführung von Rotorflechtmaschinen unter Berücksichtigung von Rotationsbewegungen*. Projektarbeit (unveröffentlicht) Technische Universität Chemnitz – Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2010
- [Hes13] HEINRICH, S.: *Entwicklung und Umsetzung eines mechatronischen Gesamtkonzeptes zur Leistungssteigerung des Soft-Stich-Mode*. Masterarbeit (unveröffentlicht) Technische Universität Chemnitz – Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2013
- [His12a] N.N.: *History of Braiding – The Beginning and Walford*. N.N. 2012
- [His12b] N.N.: *History of Braiding –Rotary Machines, for Cables and non technical products*. N.N. 2012
- [His13] N.N.: *History of American Textiles*. Forgotten Books, London 2013 – PIBN 10000486960
- [Hon14] HORN, J.; GRAVE, G.: *Innovative Produkte und Anwendungsbereiche durch neuartige Flechttechniken*. 1. Mönchengladbacher Flecht-Kolloquium, Mönchengladbach 2014-11-7

- [Huf07] HUFENBACH, W.: *Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus*. SDV-Die Medien AG, Dresden 2007 - ISBN 978-3-00-022109-5
- [Ill15] ILLMANN, S.: *Methodische Entwicklung einer Spezialflechtmaschine*. Bachelorarbeit (unveröffentlicht) Technische Universität Chemnitz – Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2015
- [Kes02] KESSELS, J.F.A.; AKKERMANN, R.: *Prediction of the yarn trajectories on complex braided preforms. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Elsevier, 2002, S. 1073-1081
- [Kin12] KINDERMANN, I.A.: *Systematik, Analyse und Simulation von Flechtmaschinen und der Technologie des Flechtens*. Bachelorarbeit (unveröffentlicht) Technische Universität Chemnitz – Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2012
- [Koe11] KOETSIER, T.; KERLE, H.; YAN, H.-S.: *The History of Mechanism and Machine Science (HMMS) and IFToMM's Permanent Commission for HMMS*. Part II. In [Cec11], S. 77-93
- [Kol94] KOLLER, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau - Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. Springer Verlag, Berlin 1994 - ISBN 978-3-662-08166-2
- [Krz14] KRZYWINSKI, S.; et al: *Drapieren, textiltechnische 3D-Formgebung oder Konfektionieren – Ergebnisse theoretischer und experimenteller Untersuchungen am Beispiel eines druckbelasteten FVK-Bauteiles als Entscheidungshilfe zur faserbundgerechten Konstruktion*. 14. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2014-05-14, S. 214-221 - ISBN 978-3-9812554-9-2
- [Kun04] KUNTZ, J.: *Einfluss von Fadenführungsparametern auf die Schädigung von Carbonfaserrovings*. Studienarbeit, Universität Stuttgart - Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Stuttgart 2004
- [Kyo15] KYOSEV, Y.: *Braiding Technology for Textiles*. 1. Aufl. Elsevier Science & Technology, Woodhead Publishing Series in Textiles, 2014 – ISBN 978-0-85709-135-2
- [Lao11] LAOURINE, E.: *Geflochtene Halbzeuge und Flechttechniken*. Kapitel 8. In [Che11], S. 307-325

- [Leh11] LEHMANN, B.; HERZBERG, C.: *Geflochtene Halbzeuge und Flechttechniken*. Kapitel 4. In [Che11], S. 111-169
- [Len14] LENGERSDORF, M.; GRIES, T.: *Flechten - Geeignetes Herstellungsverfahren für faserverstärkte Druckbehälter als Energiespeicher im Automobil?* 1. Mönchengladbacher Flecht-Kolloquium, Mönchengladbach 2014-11-7
- [Lep53] LEPPERHOFF, B.: *Die Flechtereie*. 3.Aufl. Eugen G. Leuze-Verlag, Saulgau 1953
- [Mat02] MATTHES, J.: *Systematische Auslegung von Kurvenkoppelgetrieben für Führungsbewegungen*. Dissertation, TU-Chemnitz - Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Chemnitz 2002
- [Mei12] MEINEL, A.: *Analyse einer bestehenden Getriebestruktur mit anschließender Optimierung der konstruktiven Gestaltung*. Studienarbeit (unveröffentlicht) Technische Universität Chemnitz – Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2012
- [Met14] METZNER, U.: *Textiltechnologien für endkonturnahe Preforms*. 14. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2014-05-14, S. 151-157 – ISBN 978-3-9812554-9-2
- [Mey12] MEYER, T.; DENNINGER, D.; BERGER, M.: *Ansatz zur konstruktiven Optimierung eines Nutkurvengetriebes mittels Creo und RecurDyn*. 14. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag, Bayreuth 2012-09-19
- [Mey14] MEYER, T.; GABLER, M.; NGUYEN-DANG, T.; DENNINGER, D.; BERGER, M.: *Mechanismenentwicklung einer Antriebsbaugruppe zur Integration von Festkörpern in ein technisches Textil*. 17. VDI Getriebetagung – Bewegungstechnik, Nürtingen 2014-09-24
- [Mil14] MILWICH, M.: *Flechtpultrusion & Flechtentwicklungen am ITV Denkendorf*. 1. Mönchengladbacher Flecht-Kolloquium, Mönchengladbach 2014-11-7
- [Mil98] MILWICH, M.: *Entwicklung eines neuen 3D-Flechtverfahrens zur Herstellung kraftflussoptimierter Faserverbundbauteile*. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 496, Düsseldorf 1998 – ISBN 3-18-349602-x

- [Mod11] MODLER, N.; et. al.: *An integral design and manufacturing concept for crash resistant textile and long-fibre reinforced polypropylene structural components*. Procedia Engineering 10 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM11), Villa Erba, Como, Italy 2011, S. 2086-2091 - ISSN 1877-7058
- [Mod12] MODLER, N.; et. al.: *Textilverstärkte Leichtbaukomponenten mit hoher Funktionsintegration für Anwendungen im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Tagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik, Dresden 2012-03-22/23, S. 211-222 – ISBN 978-3-867780-272-7
- [Mod13] MODLER, N.; et. al.: *Application of Transmission-Based Solutions for Automated Manufacturing of Thermoplastic Hybrid Sandwich Structures*. Procedia Materials Science Volume 2, Elsevier 2013, S. 83-91 – ISSN 2211-8128
- [Mue12] MÜLL, K.: *Fadenschonende Oberfläche zur Herstellung und Umlenkung von Carbon-, Aramid- und Glasfasern*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 111 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Nic14] NICOLAU, A.; KYOSEV, Y.; HEIMLICH, F.: *Fadenspannungsdifferenzen bei Rundflechten*. 1. Mönchengladbacher Flecht-Kolloquium, Mönchengladbach 2014-11-7
- [Nig09] NIGGEMANN, H.: *CAD-gestützte grafische Maßsynthese sphärischer und räumlicher Übertragungskurvengetriebe*. Shaker Verlag, Aachen 2009 – ISBN 978-3-8322-7862-5
- [Pah07] PAHL, G.; FELDHUSEN, J.: *Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung*. 7.Aufl. Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York 2007 - ISBN 978-3-540-34060-7
- [Paz10] PAZ, E. B.; et al: *A Brief Illustrated History of Machines and Mechanisms*. Nr.10. Springer Verlag, 2010 - ISBN 978-90-481-2511-1
- [Pic09a] PICKETT, A. K.; et al: *Comparison of analytical and finite element simulation of 2D braiding*. *Plastics, Rubber and Composites* Nr. 38, 2009, S. 387-395
- [Pic09b] PICKETT, A. K.; SIRTAUTAS, J.; ERBER, A.: *Braiding Simulation and Prediction of Mechanical Properties*. *Applied Composite Materials* Nr. 16, Springer, 2009, S. 345-364



- [Pin12] PINKERT, C.; et al.: *Neuartige Flachkulierwirkmaschine zur Herstellung regulärer Strukturen mit biaxialem Schusseintrag*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 43-47 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Pot03] POTLURI, P.; et al: *Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Nr. 34, Elsevier, 2003, S. 481-492
- [Pot06] POTLURI, P.; et al: *Flexural and torsional behaviour of biaxial and triaxial braided composite structures*. *Composite Structures* Nr. 75, Elsevier, 2006, S. 377-386
- [Pot12] POTLURI, P.: *Braiding*. *Wiley Encyclopedia of Composites*, John Wiley & Sons, 2012
- [Pur12] PUROL, H.; et al: *Automatisierte Preformtechnologien für Flugzeugstrukturen*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 289-296 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Rav14] VAN RAVENHORST, J.; AKKERMAN, R.: *Simulation of the overbraiding process using complex shaped mandrels*. 1. Mönchengladbacher Flecht-Kolloquium, Mönchengladbach 2014-11-7
- [Raw05] RAWAL, A.; POTLURI, P.; STEELE, C.: *Geometrical Modelling of the yarn paths in three-dimensional braided structures*. *Journal of Industrial Textiles* Nr. 35, SAGE Publications, 2005, S. 115-135
- [Raw07] RAWAL, A.; POTLURI, P.; STEELE, C.: *Prediction of yarn paths in braided structures formed on a square pyramid*. *Journal of Industrial Textiles* Nr. 36, SAGE Publications, 2007, S. 221-226
- [Rei12] REIMANN, N.; NENDEL, K.; MICHAEL, M.: *Textile Maschinenelemente in der Fördertechnik*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 333-336 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Rob09] ROBERTS, G.D.; et al: *Characterization of Triaxial Braided Composite Material Properties for Impact Simulation*. 65th Annual Forum and Technology Display, Grapevine (Texas) 2009-05-27
- [Rod91] RODENACKER, W.G.: *Methodisches Konstruieren - Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele*. Springer Verlag, Berlin 1991 - ISBN 978-3-540-53977-3

- [Roe91] ROSENBAUM, J.U.: *Flechten - Rationelle Fertigung faserverstärkter Kunststoffbauteile*. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1991
- [Rot00] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 1: Konstruktionslehre*. 3.Aufl. Springer-Verlag, Berlin 2000 – ISBN 978-3-540-67142-8
- [Rot01] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 2: Kataloge*. 3.Aufl. Springer-Verlag, Berlin 2001 – ISBN 978-3-540-67026-1
- [Sca99] SCHAEFFER, T.: *Systematisches Lösen von Führungs-Bewegungsaufgaben*. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 1, Nr. 312, Düsseldorf 1999 - ISBN 3-18-331201-8
- [Scf14] SCHÄFER, J.; GRIES T.: *Kontinuierliche Herstellung von faserverstärkten Profilen mittels Flechtrusion*. 1. Mönchengladbacher Flecht-Kolloquium, Mönchengladbach 2014-11-7
- [Sci12] SCHIEBEL, P.; HERRMANN, A.S.: *Analyse des Verformungsverhaltens von Kohlenstoff-Rovings im textilen Fertigungsprozess für belastungsgerechte CFK-Strukturen*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 186-192 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Scr13] SCHREIBER, F.: *Methodik zur Entwicklung integrativer Automatisierungskonzepte für die Herstellung geflochtener Implantate*. 1.Aufl. Shaker Verlag, Aachen 2013 – ISBN 978-3-844-01756-4
- [Scu07] SCHÜRMANN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin 2007 – ISBN 978-3-540-72189-5
- [Stu07] STUEVE, J.; et al.: *Simulation of braiding technology along the complete process chain*. SAMPE Europe International Conference, Paris, 2007
- [Vol68] VOLMER, J.: *Getriebetechnik - Lehrbuch*. VEB Verlag Technik Berlin, Berlin 1968
- [Vol88] VOLMER, J.: *Getriebetechnik - Zahnriemengetriebe*. 1.Aufl. VEB Verlag Technik Berlin, Berlin 1988 – ISBN 3-341-00468-8
- [Vol89] VOLMER, J.: *Getriebetechnik - Kurvengetriebe*. 2.Aufl. VEB Verlag Technik Berlin, Karl-Marx-Stadt 1989 – ISBN 3-341-00474-2
- [Vol90] VOLMER, J.: *Getriebetechnik - Umlaufrädergetriebe*. 4.Aufl. VEB Verlag Technik Berlin, Berlin 1990 – ISBN 3-341-00801-2

- [Vol92] VOLMER, J.: *Getriebetechnik - Grundlagen*. 1.Aufl. VEB Verlag Technik Berlin, München 1992 – ISBN 3-341-00934-5
- [Wag07] WAGNER, H.; et al: *Impact Behavior and Residual Strength of Carbon Fiber Textile based Materials*. SETEC 07, Madrid 2007-02
- [Wal13] WALLASCH, R.: *Entwicklung eines kontinuierlich arbeitenden Antriebskonzeptes zur Herstellung einer neuartigen Faserverbundkonstruktion*. Diplomarbeit (unveröffentlicht) Technische Universität Chemnitz – Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz 2013
- [Win12] WITTEN, E.: *Glasfaserverstärkte Kunststoffe - Aktuelle Marktzahlen und Trends*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 304-310 - ISBN 978-3-9812554-7-8

## 8.2 Normen, Richtlinien und Patente

- [DIN20018-1] Schläuche mit Textileinlagen – *Teil 1: Maximaler Arbeitsdruck PN 10/16*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 2003
- [DIN20021] Fluidtechnik – *Schläuche mit Einlage – Ergänzungen zu DIN EN 853 bis DIN EN 857*. . Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 1997
- [DIN60000] Textilien – *Grundbegriffe*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 1987
- [DIN60001-1] Textile Faserstoffe - *Teil 1: Naturfasern und Kurzzeichen*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 1980
- [DIN60001-2] Textile Faserstoffe - *Faser- und Herstellungsformen*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 2008

- [DIN60900-1]      *Garne - Technologische Einteilung, Begriffe*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 2006
- [DIN60905]      *Tex-System - Grundlagen*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 1985
- [DIN60910]      *Textile Faserstoffe – Entwurf*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 2006
- [DIN61100-1]      *Gewebe - Kennzeichnende Merkmale*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 1980
- [DIN89158]      *Elektrische Kabel für Schiffe und Offshore-Einheiten – Starkstromkabel mit Schirm (Armierung)*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 1998
- [DINEN853]      *Gummischläuche und –schlauchleitungen – Hydraulikschläuche mit Drahtgeflechteinlage – Spezifikation*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 2013
- [DINEN857]      *Gummischläuche und –schlauchleitungen – Kompakthydraulikschläuche mit Drahtgeflechteinlage – Spezifikation*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 2013
- [KDT83]      *Arbeitsblätter für die Konstruktion von Mechanismen – Ein Funktions-Struktur-Speicher für den konstruktiven Entwicklungsprozess*. Kammer der Technik, Bezirksverband Suhl, Bereich Wissenschaft und Technik, Stand 1983
- [VDI2130]      *Getriebe- für Hub- und Schwingbewegungen – Konstruktion und Berechnung viergliedriger ebener Gelenkgetriebe für gegebene Totlagen*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1984
- [VDI2142-1]      *Auslegung ebener Kurvengetriebe - Grundlagen, Profilberechnung und Konstruktion*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1994

- [VDI2142-2] Auslegung ebener Kurvengetriebe - *Berechnungsmodule für Kurven- und Koppelgetriebe*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 2011
- [VDI2143-1] Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe - *Theoretische Grundlagen*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1980
- [VDI2143-2] Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe - *Praktische Anwendung*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1987
- [VDI2157] Planetengetriebe - *Begriffe, Symbole, Berechnungsgrundlagen*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 2010
- [VDI2221] Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1993
- [VDI2222-1] Konstruktionsmethodik - *Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1997
- [VDI2222-2] Konstruktionsmethodik - *Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1982
- [VDI2223] Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 2004
- [VDI2225-1] Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - *Vereinfachte Kostenermittlung*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1997
- [VDI2225-2] Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – *Tabellenwerk*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1998
- [VDI2225-3] Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – *Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1996

- [VDI2225-4] Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – *Bemessungslehre*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1997
- [VDI2723] Vektorielle Methode zur Berechnung der Kinematik räumlicher Getriebe. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1982
- [VDI2727-1] Konstruktionskataloge - Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben – *Grundlagen*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1991
- [VDI2727-2] Konstruktionskataloge - Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben – *Erzeugung hin- und hergehender Schubbewegungen Antrieb gleichsinnig drehend*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1992
- [VDI2727-3] Konstruktionskataloge - Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben – *Erzeugung gleichsinniger Drehbewegungen mit Rast(en) Antrieb gleichsinnig drehend*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 1996
- [VDI2727-4] Konstruktionskataloge - Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben – *Erzeugung von Schwingbewegungen mit Rast(en) Antrieb gleichsinnig drehend*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 2000
- [VDI2727-5] Konstruktionskataloge - Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben – *Erzeugung von ungleichmäßigen Umlaufbewegungen ohne Stillstand (Vorschaltgetriebe) Antrieb gleichsinnig drehend*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 2006
- [VDI2727-6] Konstruktionskataloge - Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben – *Extreme Schwinggetriebe*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 2010
- [VDI2729] Modulare kinematische Analyse ebener Gelenkgetriebe mit Dreh- und Schubgelenken - *Entwurf*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Stand 2014

- [Bel05] BELTEN, M.: *Umflechtmaschine mit zwei entgegengesetzt kreisenden Spulenreihen*. Patentschrift, Belten, M., Kaiserliches Patentamt, 1905-12-22 - DE000000178305A
- [Cah02] CAHUZAC, G.J.J.A.: *Schlauchförmige Flechtstruktur für Verbundbauteil, deren Herstellung und Anwendung*. Übersetzung der europäischen Patentschrift, Aerospatiale, M., Deutsches Patent- und Markenamt, 2002-15-05 - DE000069712706T2
- [Die91] DIERL, R.: *Verfahren zur Herstellung von Faserverbund-Bauteilen*. Offenlegungsschrift, MAN Technologie AG, Deutsches Patentamt, 1991-08-22 - DE000004004473A1
- [Emm12] EMMERICH, W.: *Kreisförmige Schlittenbahnführung für eine Flechtmaschine*. Offenlegung, Emmerich, W., Deutsches Patent- und Markenamt, 2012-01-12 - DE102010026470A1
- [Emm96] EMMERICH, W.; DEITERS, K.: *Flechtmaschine*. Patentschrift, Spirka Maschinenbau GmbH und Co.KG, Deutsches Patentamt, 1996-07-04 - DE000004446559C1
- [Geß12] GEßLER, A.; MAIDL, F.: *Verfahren zum Herstellen von Faserverbund-Halbzeugen mittels Rundflechttechnik*. Patentschrift, EADS Deutschland GmbH, Deutsches Patent- und Markenamt, 2012-03-29 - DE102004017311B4
- [Hae98] HAEHNEL, R.; et al: *Rotary Braider Machine*. US-Patent, Rockwell International/ Magnatech International, United States Patent Office, 1998-07-07 - US000005775195A
- [Hec05] HECKER, R.: *Herstellverfahren für einen Hochdruck-Dehnschlauch*. Patentschrift, ContiTech Schlauch GmbH, Deutsches Patent- und Markenamt, 2005-02-03 - DE10334673B3
- [Hor20a] HORN, G.: *Rundflechtmaschine mit zwei entgegengesetzt umlaufenden Spulreihen*. Patentschrift, Horn, G., Reichspatentamt, 1920-01-05 – DE00000000317415A
- [Hor20b] HORN, G.: *Rundflechtmaschine*. Patentschrift, Horn, G., Reichspatentamt, 1920-04-12 – DE0000000320100A

- [Hor20c] HORN, G.: *Spulenträger für Flechtmaschinen*. Patentschrift, Horn, G., Reichspatentamt, 1920-07-20 – DE000000322803A
- [Hor20d] HORN, G.: *Fadenführungshebel für Rundflechtmaschinen*. Patentschrift, Horn, G., Reichspatentamt, 1920-07-21 – DE000000323378A
- [Hor20e] HORN, G.: *Rundflechtmaschine*. Patentschrift, Horn, G., Reichspatentamt, 1920-09-20 – DE00000000324669A
- [Hor32] HORN, G.: *Rundflechtmaschine mit zwei entgegengesetzt kreisenden Spulenreihen*. Patentschrift, Horn, G., Reichspatentamt, 1932-08-17 – DE000000557008A
- [Jan06] JANSSEN, H.: *Braiding Machine*. US-Patent, Textile Machine works of Wyomissing, Pennsylvania, United States Patent Office, 1906-01-06 – US000000810056A
- [Kle99a] KLEIN, J. T.; et al: *Braided fabric and method of forming*. US-Patent, Auburn University, United States Patent Office, 1999-05-04 – US5899134
- [Kle99b] KLEIN, J. T.; et al: *Rotably driven braiding machine with third yarns carried and delivered by stationary carriages about a braiding point*. US-Patent, Auburn University, United States Patent Office, 1999-06-22 – US5913959
- [Kli09] KLEINER, G.: *Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung eines Geflecht*. Offenlegungsschrift, Bossert & Kast GmbH & Co.KG, Deutsches Patent- und Markenamt, 2009-08-13 – DE102009007949A1
- [Lan78] LANGENSIEPEN, G.: *Neuerung an Klöppelmaschinen*. Patentschrift, Langensiepen, G., Kaiserliches Patentamt, 1878-01-08 – DE000000002331A
- [Mul13] MÜLLER, B.; VOCKENTANZ, R.: *Rotationsflechtmaschine*. Offenlegungsschrift, Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co KG, Deutsches Patent- und Markenamt, 2013-03-07 – DE102011112660A1



- [Pap05] PAPE, H.-D.: *Strangführungsvorrichtung, insbesondere für Umlaufflechtmachines*. Patentschrift, Wardwell Braiding Machine Co., Central Falls, R.I., US, Deutsches Patent- und Markenamt, 2005-02-10 - DE000019925941A1
- [Rah07] RAHM, C.: *Braiding Machine*. US-Patent, Textile Machine works of Wyomissing, Pennsylvania, United States Patent Office, 1907-06-06 – US000000856985A
- [Thu11] THUN, F.; RAHM, C.: *Braiding Machine*. US-Patent, Textile Machine works of Wyomissing, Pennsylvania, United States Patent Office, 1911-08-22 - US000001001092A
- [Tob19] TOBER, C.: *Flechtmaschine*. Patentschrift, Tober,C., Reichspatentamt, 1919-03-18 DE000000311306A
- [Tob20] TOBER, C.: *Rundflechtmaschine*. Patentschrift, Tober,C., Reichspatentamt, 1920-09-11 DE000000325248A
- [Tob21a] TOBER, C.: *Fadenführvorrichtung für Rundflechtmaschinen*. Patentschrift, Tober,C., Reichspatentamt, 1921-12-09 - DE000000345351A
- [Tob21b] TOBER, C.: *Fadenführung für Rundflechtmaschinen*. Patentschrift, Tober,C., Reichspatentamt, 1921-08-20 – DE000000339930A
- [Wad00] WARDWELL, S.W. JR.: *Winding Machine*. US-Patent, Universal Winding Company, of Portland, Maine, United States Patent Office, 1900-06-26 – US000000652572A
- [Wad07] WARDWELL, S.W. JR.; PARKS, E.F.: *Braiding Machine*. US-Patent, United States Patent Office, 1907-4-23 - US000000851204A

### 8.3 Onlinequellen

- [Aub15] AUBURN UNIVERSITY – DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING: *David G. Beale, Professor, Ph. D, PE, Department of Mechanical Engineering*. Online verfügbar unter: <http://www.eng.auburn.edu/~dbeale/> (Zugriff 16.06.2015]
- [Aug15a] AUGUST HERZOG MASCHINENFABRIK GMBH & Co. KG: *Erfolgschronik*. Online verfügbar unter: [http://www.herzog-online.com/\\_rubric/index.php?rubric=Unternehmen+Erfolgschronik+DE](http://www.herzog-online.com/_rubric/index.php?rubric=Unternehmen+Erfolgschronik+DE) (Zugriff 15.06.2015)
- [Aug15b] AUGUST HERZOG MASCHINENFABRIK GMBH & Co. KG - PRODUKTE: *Faserverbundwerkstoffe*. Online verfügbar unter: [http://www.herzog-online.com/\\_rubric/index.php?rubric=Produkte+Faserverbundwerkstoffe+DE](http://www.herzog-online.com/_rubric/index.php?rubric=Produkte+Faserverbundwerkstoffe+DE) (Zugriff 15.06.2015)
- [Aug15c] AUGUST HERZOG MASCHINENFABRIK GMBH & Co. KG - PRODUKTE: *Packungsflechtmaschine PA 03*. Online verfügbar unter: [http://www.herzog-online.com/\\_rubric/index.php?rubric=Produkte+Packungsflechtmaschinen+DE](http://www.herzog-online.com/_rubric/index.php?rubric=Produkte+Packungsflechtmaschinen+DE) (Zugriff 15.06.2015)
- [COE15] RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN -CLUSTER OF EXCELLENCE "INTEGRATIVE PRODUCTION TECHNOLOGY FOR HIGH-WAGE COUNTRIES"-RESEARCH-DEMONSTRATORS: *Self-optimization of the Radial Braiding Process*. Online verfügbar unter: <https://www.produktionstechnik.rwth-aachen.de/cms/Produktionstechnik/Forschung/~gvda/Demonstratoren/lidx/1/> (Zugriff 15.06.2015)
- [DFG15a] DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT: *SPP 1123: Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus*. Online verfügbar unter: <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5471302> (Zugriff 15.06.2015)

- [DFG15b] DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT: SFB 639: *Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen*. Online verfügbar unter: <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5485977> (Zugriff 15.06.2015)
- [DFG15c] DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT: GR 1311/27-1: *Tribologische Untersuchungen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Kohlenstofffasern*. Online verfügbar unter: <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/160776827> (Zugriff 15.06.2015)
- [DMG15] GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER DIGITALEN MECHANISMEN- UND GETRIEBEBIBLIOTHEK E. V.: *Getriebetechnik im Wandel der Zeit*. Online verfügbar unter: <http://www.dmg-lib.org/dmglib/main/portal.jsp?mainNaviState=experience> (Zugriff 17.06.2015)
- [Gra15a] GRACE'S GUIDE – BRITISH INDUSTRIAL HISTORY: *Standard Machine Works*. Online verfügbar unter: [http://www.graces-guide.co.uk/Standard\\_Machine\\_Works](http://www.graces-guide.co.uk/Standard_Machine_Works) (Zugriff 15.06.2015)
- [Gra15b] GRACE'S GUIDE – BRITISH INDUSTRIAL HISTORY: *Thomas Larmuth and Co*. Online verfügbar unter: [http://www.graces-guide.co.uk/Thomas\\_Larmuth\\_and\\_Co](http://www.graces-guide.co.uk/Thomas_Larmuth_and_Co) (Zugriff 15.06.2015)
- [Gra15c] GRACE'S GUIDE – BRITISH INDUSTRIAL HISTORY: *Dobson and Barlow*. Online verfügbar unter: [http://www.gracesguide.co.uk/Dobson\\_and\\_Barlow](http://www.gracesguide.co.uk/Dobson_and_Barlow) (Zugriff 15.06.2015)
- [IFB15] UNIVERSITÄT STUTTGART – FAKULTÄT LUFT- UND RAUMFAHRTTECHNIK UND GEODÄSIE – INSTITUT FÜR FLUGZEUGBAU: *Faserverbundtechnologie*. Online verfügbar unter: <http://www.ifb.uni-stuttgart.de/fertigungstechnologie/faserverbundtechnologie.html> (Zugriff 15.06.2015)
- [ILK15] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN – FAKULTÄT MASCHINENWESEN – INSTITUT FÜR LEICHTBAU UND KUNSTSTOFFTECHNIK: *Forschung*. Online verfügbar unter: [https://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_maschinenwesen/ilk/forschung](https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ilk/forschung) (Zugriff 15.06.2015)

- [Ind11] INDUSTRIE – ANZEIGER – AUSGABE 33, 2011, GUIDO GRAVE: *Flechttechnologie bietet Lösungen für den automatisierten Leichtbau von morgen – Nichts ist leichter als ein geflochtenes Teil*. Online verfügbar unter: [http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/12503/35278946/Nichts-ist-leichter-als-ein-geflochtenes-Teil/art\\_co\\_INSTANCE\\_0000/maximized/](http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/12503/35278946/Nichts-ist-leichter-als-ein-geflochtenes-Teil/art_co_INSTANCE_0000/maximized/) (Zugriff 15.06.2015)
- [ITA15] RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN – FAKULTÄT MASCHINENWESEN – INSTITUT FÜR TEXTILTECHNIK: *Schwerpunkte*. Online verfügbar unter: <http://www.ita.rwth-aachen.de/3-f-und-d/3-01-00-schwerpunkte.htm> (Zugriff 15.06.2015)
- [Kre15] KRENZLER FLECHT - UND KLÖPPELSPITZENMASCHINEN GMBH & CO. KG: *Gründung und Entwicklung der Firma Krenzler*. Online verfügbar unter: <http://www.krenzler-gmbh.de/uberuns.htm> (Zugriff 15.06.2015)
- [Lap15] U.I. LAPP GMBH – LAPPKABEL DEUTSCHLAND GMBH: *Katalog*. Online verfügbar unter: <http://www.lappkabel.de/produkte/online-kataloge-shop.html> (Zugriff 16.06.2015)
- [LCC15] TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN – FAKULTÄT MASCHINENWESEN – LEHRSTUHL FÜR CARBON COMPOSITES: *Prozesstechnik für Fasern und Halbzeuge*. Online verfügbar unter: <http://www.lcc.mw.tum.de/de/forschungsgruppen/prozesstechnik-fuer-fasern-und-halbzeuge/> (Zugriff 15.06.2015)
- [Leo15] LEONI: *LEONI elocab GmbH, Georgensgmünd*. Online verfügbar unter: <https://www.leoni.com/de/unternehmen/standorte/deutschland/leoni-elocab-gmbh-georgensgmueund/> (Zugriff 16.06.2015)
- [Mag15a] MAGNATECH INTERNATIONAL, INC. – HISTORY. Online verfügbar unter: <http://www.magnatech-int.com/> (Zugriff 15.06.2015)
- [Mag15b] MAGNATECH INTERNATIONAL, INC. – PRODUCTS: *Rotary Braiders Rb-2*. Online verfügbar unter: <http://www.magnatech-int.com/> (Zugriff 15.06.2015)

- [May15] MAYER BRAIDTECH GMBH: *Lexicon: history of Braiding*. Online verfügbar unter: [http://www.mayerbraid.de/lexicon/194\\_201.htm](http://www.mayerbraid.de/lexicon/194_201.htm) (Zugriff 15.06.2015)
- [Mir15] MICHAEL BIEBER - MIRA FLECHTERTECHNIK GMBH: *Ersatzteile*. Online verfügbar unter: <http://www.mira-flechtermaschinen.de/deu/ersatzteile/ersatzteile.php> (Zugriff 16.06.2015)
- [Nie15] MASCHINENFABRIK NIEHOFF GMBH & Co KG: *Flechtmaschinen und Umspuler*. Online verfügbar unter: <http://www.niehoff-gmbh.info/de/products/braider-rewinder> (Zugriff 15.06.2015)
- [Rho15] RHODE ISLAND HERITAGE HALL OF FAME - INDUCTEES: *Simon Willard Wardwell*. Online verfügbar unter: [http://www.riheritagehalloffame.org/inductees\\_detail.cfm?iid=610](http://www.riheritagehalloffame.org/inductees_detail.cfm?iid=610) (Zugriff 15.06.2015)
- [Ste15a] KÖRTING NACHFOLGER WILHELM STEEGER GMBH & Co. KG - HOME: *Chronik wie alles begann*. Online verfügbar unter: <http://www.steeger-online.de/deutsch/chronik.php> (Zugriff 15.06.2015)
- [Ste15b] KÖRTING NACHFOLGER WILHELM STEEGER GMBH & Co. KG - PROGRAMM: *Horizontalflechtmaschine HS 216*. Online verfügbar unter: [http://www.steeger-online.de/deutsch/programm\\_horizontale\\_hs216.php](http://www.steeger-online.de/deutsch/programm_horizontale_hs216.php) (Zugriff 15.06.2015)
- [Ste15c] KÖRTING NACHFOLGER WILHELM STEEGER GMBH & Co. KG - PROGRAMM: *Packungsflechtmaschinen*. Online verfügbar unter: [http://www.steeger-online.de/deutsch/programm\\_packungen.php](http://www.steeger-online.de/deutsch/programm_packungen.php) (Zugriff 15.06.2015)
- [Sti15] **WALTER VOM STEIN OHG – STEINTEX**: *Spulen*. Online verfügbar unter <http://www.steintex.de/produkte/spulen/> (Zugriff 16.06.2015)
- [Spi15a] SPIRKA SCHNELLFLECHTER GMBH: *Unternehmen*. Online verfügbar unter: <http://www.spirka-schnellflechter.com/de/unternehmen.html> (Zugriff 15.06.2015)
- [Spi15b] SPIRKA SCHNELLFLECHTER GMBH – PRODUKTE: *Flechtmaschinen*. Online verfügbar unter: <http://www.spirka-schnellflechter.com/de/unternehmen.html> (Zugriff 15.06.2015)

- [Toh15] TOHO TENAX EUROPE GMBH - PRODUKTE: *Tenax® Filamentgarn*. Online verfügbar unter: <http://www.tohotenax-eu.com/produkte/tenax-kohlenstofffasern/filamentgarn.html> (Zugriff 15.06.2015)
- [War15a] WARDWELL BRAIDING MACHINE COMPANY – WELCOME: *Company Profile*. Online verfügbar unter: <http://www.wardwell.com/history.asp> (Zugriff 15.06.2015)
- [War15b] WARDWELL BRAIDING MACHINE COMPANY – BRAIDERS: *Maypole – Composite Braider*. Online verfügbar unter: <http://www.wardwell.com/CompositBraider.asp> (Zugriff 15.06.2015)
- [War15c] WARDWELL BRAIDING MACHINE COMPANY – BRAIDERS: *Deflectors*. Online verfügbar unter: <http://www.wardwell.com/deflector.asp> (Zugriff 15.06.2015)

## **9        Anlagenverzeichnis**

### **9.1     Eingangsbestätigung zur Patentanmeldung**

#### **Anmerkung:**

Eingangsbestätigung zur Patentanmeldung wurde entfernt.

Der Veröffentlichungstag der Patenterteilung ist der **28. Januar 2016**.

Die Offenlegungsschrift ist unter der Patentnummer **DE 10 2014 016 832 B3** vom DPMA veröffentlicht.

## 9.2 Anmeldungsbewertung durch die SPVA

Horn3D Überflechten

**SPVA** Sächsische Patent  
Verwertungs Agentur

### Bewertung

PROJEKTNUMMER:	GWT 10185
AZ TUC	V489
KURZTITEL:	<b>Horn3D-Verfahren zum Überflechten</b>
BEARBEITER:	GWT-TUD GmbH Fachbereich SPVA Steffen Gießmann Blasewitzer Straße 43 01307 Dresden Tel. 0351.25933167 Fax 0351.25933111 Email: steffen.giessmann@gwtonline.de
BEAUFTRAGUNG:	Auftrag zur Bewertung der Erfindungsmeldung  „Horn3D - Verfahren und Vorrichtung zum Überflechten eines Flecht- kerns mit dreidimensionaler Flechtadenablage“ Technologie zum Überflechten mit dreidimensionaler Flechtadenabla- ge auf spezielle geschlossene Werkzeugkonturen für Profile und lang- gestreckte Bauteile mit variablem Querschnitt  mit Schreiben der TU Chemnitz von Herrn Dr. Muster, Dezemat 3.0, Abt. 3.3 (Haushalt und Wirtschaft), vom 30.09.2014
ERFINDER:	TU Chemnitz  Institut Füge- und Montagetechnik Professur Montage- und Handhabungstechnik  Dipl. Ing. Daniel Denninger Prof. Dr.-Ing. Maik Berger

**Der Hochschule wird empfohlen, die Erfindung unbeschränkt in Anspruch zu nehmen und zum Patent anzumelden.**



## Horn3D Überflechten

## Arbeitsstand der beauftragten Leistung

<b>der SPVA vorliegende Dokumente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfindungsmeldung vom 29.09.2014</li> <li>- Erfindungsbeschreibung</li> </ul>
---------------------------------------	--

## Technische Problemstellung und Lösung

Die Verwendung von Bauteilen aus Faserverbundmaterialien findet mehr und mehr Anwendung in den verschiedensten Bereichen der Technik, insbesondere im Automobilbereich. Hierbei werden Kohlenstofffasern, Glasfasern oder Aramidfasern eingesetzt, um gegenüber bisher üblicherweise verwendeten Metallteilen leichtere, gleichzeitig aber mindestens ebenso stabile Bauteile herzustellen. Hierzu wird bei derzeitigen Verfahren zur Herstellung derartiger Bauteile ein aus Fasern gebildetes textiles Halbzeug flächig ausgelegt und anschließend die spätere Bauteilform herausgeschnitten. Dabei entsteht eine große Menge an Verschnitt sowie die Herausforderung des belastungsgerechten Preformings. Textile Halbzeuge sind daher kaum belastungsgerecht bei automatisierter Fertigungsweise herstellbar. Die gewöhnlich als Schichtwerkstoff aufgebauten Faserverbundbauteile sind deshalb außerdem stark mit dem Delaminationseffekt und einer schlechten Schadens- und Impacttoleranz behaftet.

**Problem und Aufgabe**

Ausgehend vom Stand der Technik beschreibt die Erfindung eine Flechtmaschine welche eine kontinuierliche gleichmäßige und verdrehungsfreie Flechtadenablage sowie eine dreidimensionale Flechtadenstruktur aufweist und damit die Herstellung eines gleichmäßigen Geflechts mit einer erhöhten mechanischen Festigkeit ermöglicht. Ziel ist das Überflechten von speziellen geschlossenen Flechtkernen für Profile und langgestreckte Bauteile mit variablem Querschnitt. Daher basiert der kinematische Aufbau auf dem Minimalanspruch von drei Spulenträgersätzen, die in ringförmiger Anordnung möglichst große Schwenk- bzw. Kippwinkel bei der gesteuerten Bewegung des Flechtkerns durch den Flechtpunkt ermöglichen. Durch dieses Prinzip wird es ermöglicht, flexible Bauteilquerschnitte durch den Flechtpunkt zu führen und eine kontinuierliche Fadenablage bei großen Konturänderungen in Längsrichtung zu realisieren.

**Lösung**

Das Anlagenkonzept setzt sich dabei aus interagierenden Systemen zusammen. Zwei gegenläufige Spulenträgersätze werden kreisförmig geführt, wobei jeder Spulenträger eine Spule von Unidirektionalmaterial trägt, welches durch die Relativbewegung abgezogen und auf dem Flechtkeim abgelegt wird. Die Anordnung der Spule ist so gestaltet, dass sie quer zur Ringachse liegt. Die kreisförmige Führungsbahn der Spulenträgersätze weist sogenannte Fächer auf, die für die Verlegung des Flechtadenmaterials des stationären Spulenträgersatzes durch oszillierende Bewegung über und unter den Kreuzungsstellen der Unidirektionalfäden verlegt wird, d.h. durch den Kettfaden auf dem stationären Spulenträger welcher auf bzw. unter den Kreuzungsstellen der Schussfäden die Bindung des Geflechts erzeugt. Durch die gesteuerte Bewegung des Flechtkerns zum Ausgleich der Querschnittsänderungen (die Querschnittsänderung wird nicht nur durch den gesteuerten Flechtkeim ausgeglichen. Wichtig ist hier das Zusammenspiel der gesamten Fadenverlegung mit Abzug, d.h. der Abzug ist gleichbedeutend mit dem gesteuerten Flechtkeim) wird die Sicherstellung der gleichmäßigen Steigung im Geflecht trotz Querschnittsänderung garantiert.

## Technologie-Position

## Hom3D Überflechten

**SPVA** Sächsische Patent  
Verwertungs Agentur

## Recherchen:

Neuheits-  
grad

- DE 4004473 A1- Verfahren zur Herstellung von Faserverbund-Bauteilen
- DE 69712706 T2 - Schlauchförmige Flechtstruktur für Verbundbauteil, deren Herstellung und Anwendungen
- DE 102012222762 A1 - Flechtmaschine und Verfahren zur Herstellung von Geflechtstrukturen
- US 4753150 - Braiding apparatus
- US 5203249 - Multiple mandrel/braiding ring
- US 5619903 - Braided preform for composite bodies
- US 8127653 - Device and method for braiding fibers into A braided structure
- US 8813626 - 3d braided composited tubes with throat sections and manufacture method thereof
- US 20130305911 - Method for braiding reinforcing fibres with variation in the inclination of the braided fibres
- US6679152 - Forming ring with adjustable diameter for braid production and method of braid production

## Ergebnis der Recherchen:

Keine der gefundenen Schriften beschreibt exakt die erfindungsgemäße Kombination des Herstellens eines Geflechts als Vereinigung von Lege- und Flechttechnik. Zwar existieren Schriften welche ein Überflechten von konturvariablen Flechtkernen beschreiben, allerdings erfolgt dies nicht in durch das in der Erfindung vorgesehene Abwickeln der Schussfadensysteme und die Bindungserzeugung durch ein separates Kettfadensystem und der damit einhergehenden Erzeugung eines triaxalen Geflechts.

Die Ergebnisse der Recherche können aufgrund der nur begrenzt zur Verfügung gestellten Zeit keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

## Marktattraktivität

## Vorteile:

## Kundennutzen

- Wenig Verschnitt (Abfall)
- Definierten Flechtadenablage auf inkonstanten Querschnitten von Profilen und langgestreckten Bauteilen
- Realisierbarkeit komplexer Profilstrukturen ohne Delaminationeffekte
- Formenvielfalt in der Querschnittsform für rotationssymmetrisches Kernmaterial mit variablem Querschnitt.
- Die Querschnittsformen können sich über die Struktur hinweg verändern
- Wenige Handhabungsschritte in der Preformherstellung und damit eine hohe Prozessstabilität

Unabhängig vom Potential für kontinuierlichen und automatisierten Fertigung von Preforms im Flugzeug- und Fahrzeugbau mit speziellen variierenden Querschnitten, welche z.B. im Bereich der Gewichtseinsparung zum Ausgleich der aktuell hohen Gewichte von mobilen Stromspeichern für die e-Mobilität eine maßgebliche Rolle spielen, bestehen bereits konkrete Kontakte zu Industriepartnern aus dem Bereich der Maschinenhersteller. Aktuell wird AiF-Projektantrag mit Indust-

## Marktpotential

## Horn3D Überflechten

SPVA Sächsische Patent  
Verwertungs Agentur

riepartner zum Nachweis des Funktionsprinzips mit dem Ziel bzw. dem Ergebnis eines Versuchsmusters erarbeitet und eingereicht. Desweiteren besteht Interesse weiterer Industriekunden, nach einem dem positiven Nachweis des Funktionsprinzips, an einer Lizenzierung des Schutzrechts bzw. die Option zur Wahrnehmung einer wirtschaftlichen Verwertung.

**Fazit**

Aus den vorliegenden Informationen und Recherchen zur Erfindung „wird festgestellt, dass

die technische Einrichtung als neu eingeschätzt werden kann, dafür die erforderliche erfinderische Leistung vorliegt und eine gewerbliche Anwendbarkeit gegeben ist.

Es wird empfohlen, die Erfindung als Patent anzumelden.

Dresden, 19.12.2014



Steffen Gießmann

9.3 Kinematische Analyse des Gangbahn-Flügelrad Systems



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ



Professur für Montage- und  
Handhabungstechnik

Projekttitel

Kinematik am Flügelrad/Klöppelfuß  
(über das Ersatzgetriebe Kurbelschleife)

Bearbeitungsstand vom 07.10.2015

Mathcad-Analyse-Toolbox (A-TB)

Definition des Antriebs

Antriebswinkel  $\phi = \varphi$

Antriebsdrehzahl am Flügelrad

Antriebsgeschwindigkeit

Antriebsbeschleunigung

$$\phi := 0.1 \text{ Grad} \cdot 360 \text{ Grad}$$

$$n_{FR} := 150 \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\omega_{FR1} := 2 \cdot n_{FR} \cdot \pi$$

$$\omega_{FR} := 0$$

$$\phi_0 := 0^\circ + \frac{FRAME}{20} \cdot 360^\circ$$

$$\omega_{FR2} := 2 \cdot n_{FR} \cdot \pi$$

Definition der kinematischen Abmessungen

Kurbelradius  $l_2 = l_3 =$  Krümmungsradius  $\rho_A$

Abstand des einlaufenden Treibers A zum Drehpunkt  $B_0$

Gestellpunkte für Schubrichtung

$$l_2 := 60 \text{ mm}$$

$$l_3 := 60 \text{ mm}$$

$$A_{01} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$B_{01} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$A_{02} := \begin{pmatrix} A_{01,0,0} + 2 \cdot l_2 \cdot A_{01,0,1} & A_{01,0,2} \\ A_{01,1,0} & A_{01,1,1} & A_{01,1,2} \\ -10 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ mm}$$
$$A_{0H1} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ mm}$$
$$A_{0H2} := \begin{pmatrix} A_{01,0,0} - 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ mm}$$



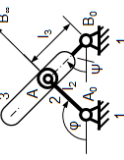
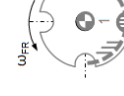
$NFR := 8$

$l_2 \cdot \frac{NFR}{\pi} = 0.153 \text{ m}$

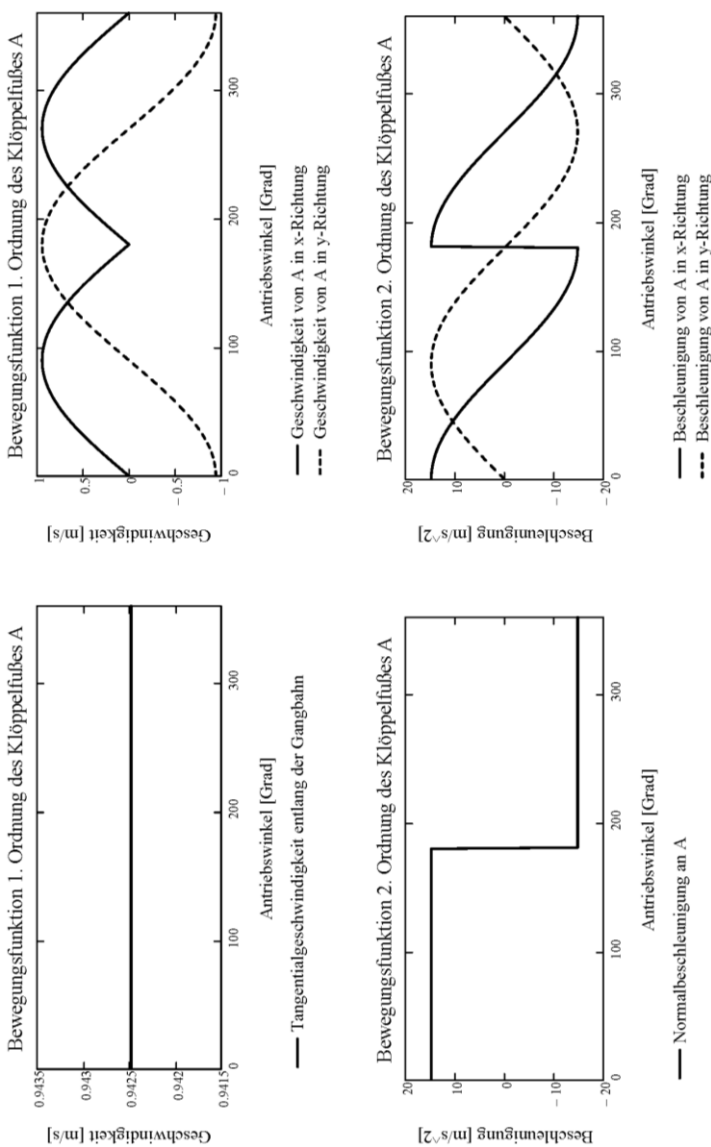
Anzahl der Flügelräder

Berechnung des Mittelpunktes der Flügelräder zur Maschinenhauptachse (näherungsweise)

**D** Einheiten entfernen

Schwingende Kurbelschleife		Malteserkreuzgetriebe		Gangbahn-Flugrad	
Kinematische Kette					
Kinematisches Schema					
Aufstellen des Antriebsvektors		$W_{11}(\phi) := (\phi \quad \omega_{FR1} \quad \alpha_{FR})$		$W_{21}(\phi) := (-\phi \quad \omega_{FR2} \quad \alpha_{FR})$	
Berechnung der Bewegung des Drehgelenkes (Treiber) A um das gestellteste Gelenk $A_0=B_0$		$A_1(\phi) := \text{DAN}(l_2, A_{01}, A_{0H1}, W_{11}(\phi))$		$A_2(\phi) := \text{DAN}(l_2, A_{02}, A_{0H2}, W_{21}(\phi))$	
		$A_1(\phi_0) := \begin{pmatrix} -0.06 & 0 & 14.804 \\ 0 & -0.942 & 0 \end{pmatrix}$		$A_2(\phi_0) := \begin{pmatrix} 0.06 & 0 & 14.804 \\ 0 & 0.942 & 0 \end{pmatrix}$	





9.4      Kinematische Analyse der Kettfadenverlegung



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ



Professur für Montage- und  
Handhabungstechnik

Projekttitel

Kinematik am Kettfadensystem

Bearbeitungsstand vom

07.10.2015

□ Datenimport, Glättung der Ausgangspunkte und Interpolation

Definition des Antriebs

Antriebswinkel  $\phi = \varphi$

Antriebsdrehzahl

Antriebsgeschwindigkeit

$$\phi := 0, 0,25^\circ \dots 90^\circ$$

$$n_{\text{PF}} := 150 \text{ min}^{-1}$$

$$\omega_{\text{PF}} := 2 \cdot n_{\text{PF}} \cdot \pi$$

Definition der kinematischen Abmessungen

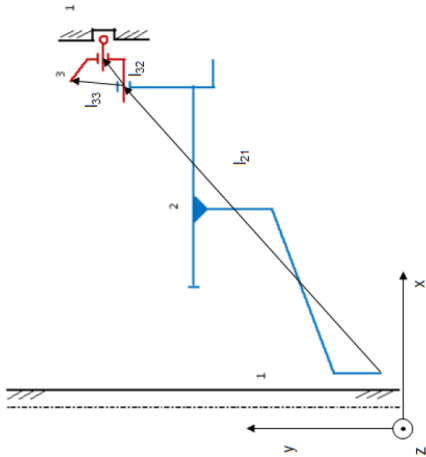
Abstand: O\_Ursprung - Fadenhebel\_Standard

Abstand: Fadenhebel\_Standard - P-Fadenhebel

$$l_{21} = \begin{pmatrix} -302,74 \\ 171,89 \\ -4,07 \end{pmatrix} \text{ mm}$$

$$l_{32} = \begin{pmatrix} -69,4 \\ -8 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ mm}$$

$$l_{33} = \begin{pmatrix} -218,3 \\ -104,4 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ mm}$$





Berechnung der Kinematik über Drehtransformationsmatrizen [Dre12, S. 69/70]

Drehmatrizen räumlich

Drehmatrix des Koordinatensystems des Fadenhebels zum Startzeitpunkt

$$A_G := \begin{pmatrix} 0.0902914 & -0.939634 & -0.330055 \\ -0.218129 & -0.342020 & 0.914025 \\ -0.971734 & -0.0105341 & -0.235843 \end{pmatrix}$$

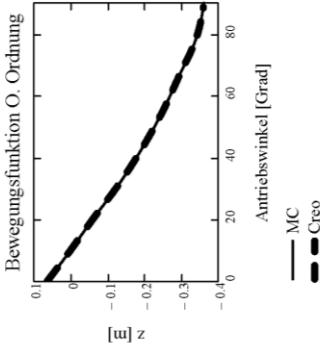
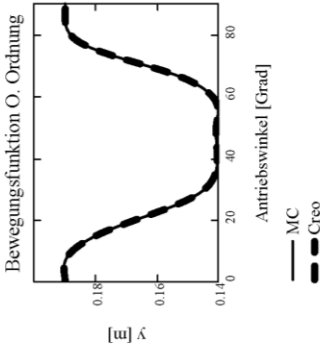
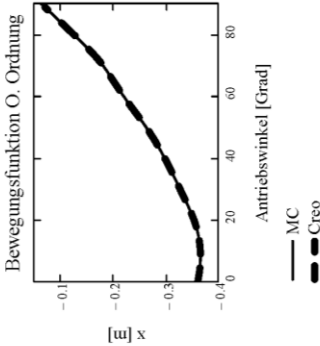
Beschreibung des Punktes auf der Drehachse des Gleitsteins

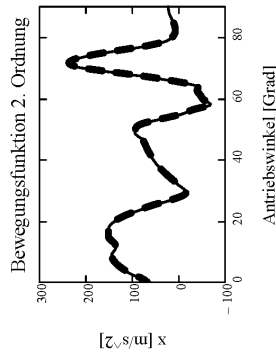
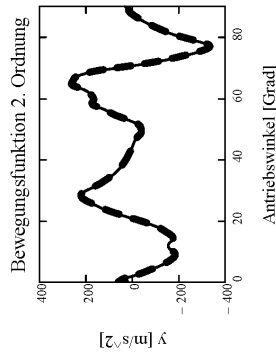
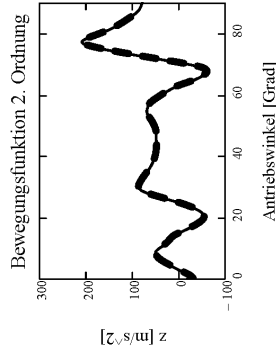
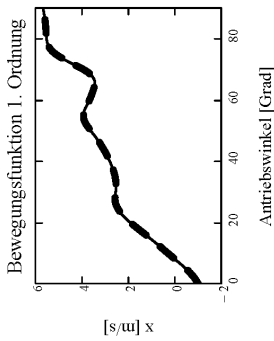
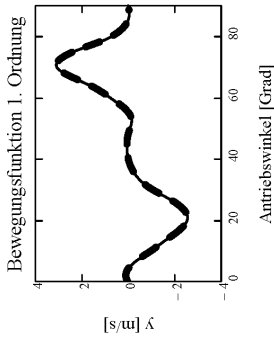
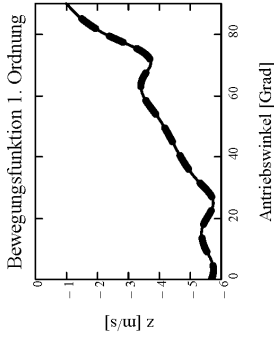
$${}^r_{FG}(\phi) := {}^r_{RF}(\phi) + A_R(\phi) \cdot A_G(\phi) \cdot A_{FG}(\phi) \cdot 1_{3 \times 2}$$

Ermittlung der Geschwindigkeit und Beschleunigung des Punktes auf der Drehachse des Gleitsteins

$${}^r_{FG}(\phi) := \frac{{}^r_{FG}(\phi + 0.1^\circ) - {}^r_{FG}(\phi)}{0.1^\circ} \cdot 1 \quad {}^{\omega}_{FF}$$
$$a_{FG}(\phi) := \frac{{}^r_{FG}(\phi + 0.1^\circ) - {}^r_{FG}(\phi)}{0.1^\circ} \cdot 1 \quad {}^{\omega}_{FF}$$
$$a_{FG}(\phi) := \frac{{}^r_{FG}(\phi + 0.1^\circ) - {}^r_{FG}(\phi)}{0.1^\circ} \cdot 1 \quad {}^{\omega}_{FF}$$



Verifikation der Ergebnisse mit dem virtuellen Modell








9.5    Kinematische Analyse der neuen Fadenverlegeeinrichtung

		Professur für Montage- und Handhabungstechnik
Technische Universität Chemnitz		
Berechnung der neuartigen Kettfadenverlegeeinrichtung		
Projekttitel		
Bearbeitungsstand vom	07.10.2015	
Datenimport, Vergleichsdaten Hebelstecher		
Kinematische Beschreibung der neuen Kettfadenverlegeeinrichtung		
Definition des Antriebs		
Antriebswinkel $\phi = \varphi$	$\phi := 0,1 \text{ Grad}, 720 \text{ Grad}$	
Antriebsdrehzahl an der Kurbel	$n := 1440 \cdot \text{min}^{-1}$	
Antriebsgeschwindigkeit	$\omega := 2 \cdot n \cdot \pi$	
Definition der kinematischen Abmessungen der Schubkurbel		
Kurbelradius $l_2$	$l_2 := 82,5 \text{ mm}$	
Pleuellänge $l_3$	$l_3 := 233,5 \text{ mm}$	
Gestellpunkte für Schubrichtung	$A_0 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ mm}$	$B_0 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 360 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ mm}$
		$K_1 := 1$
		$A_{\text{Hf}} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ mm}$

 Einheiten entfernen

Berechnung der nichtlinearen Antriebsfunktion der Schubkurbel über Ellipsenräder

Achsabstand  
 $\epsilon := 1$

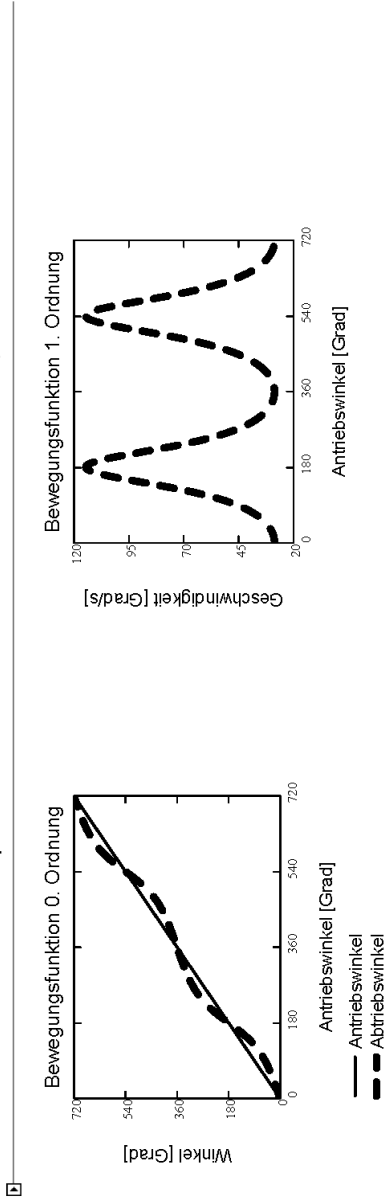
Maximalübersetzung  
 $\text{im} := 2$

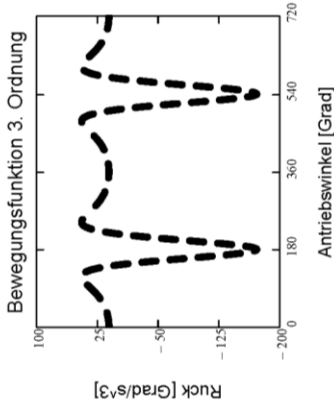
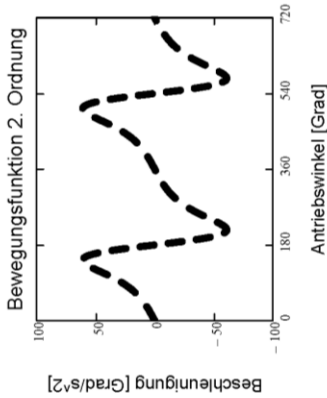
große Halbachse  
 $a := \frac{\epsilon}{2}$

$a = 0.5$

Übertragungsfunktion:  
$$r(\phi) := \sqrt{(\epsilon - 2f \cdot \cos(\phi))^2 + (2f \cdot \sin(\phi))^2}$$
$$\gamma(\phi) := \arcsin\left(\frac{2f \cdot \sin(\phi)}{r(\phi)}\right)$$

An- und Abtriebsdrehwinkel der Ellipsenräder





D

### Ellipsenräder für die oben vorgegebene Maximalübersetzung im

#### Schubkurbel mit Vorschalgetriebe (elliptisches Zahnradpaar)

Für den Antrieb der Kurbel wird ein gleichmäßig übersetzendes Zahnradpaar mit  $i = 2$  zwischen-  
geschaltet.

$$\psi_S(\phi) := \frac{\psi(\phi-2)}{2}$$

$$\omega_S(\phi) := \omega(\phi-2) + (2 \cdot \pi \cdot n)$$

$$\alpha_S(\phi) := 2 \alpha(\phi-2) + (2 \cdot \pi \cdot n)^2$$

Definition des Antriebsvektors:

$$w(\phi) := (\psi_S(\phi) \quad \omega_S(\phi) \quad \alpha_S(\phi))$$

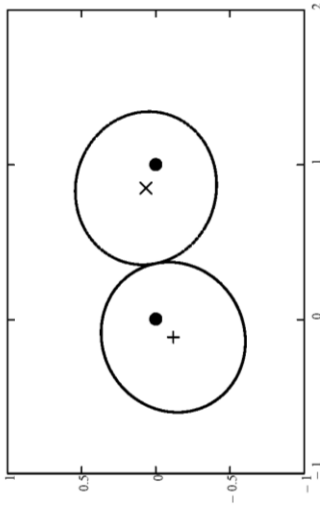
Kurbel:

$$A(\phi) := \text{DAN}(I_2, A_0, A_{\text{eff}}, w(\phi))$$

Koppel:

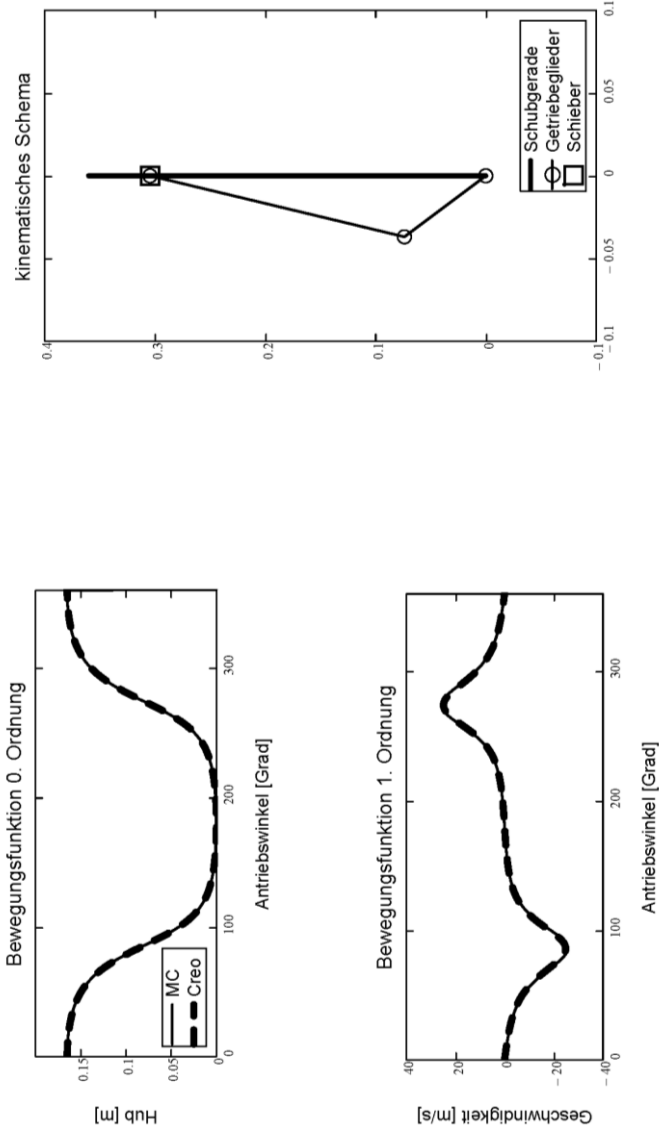
$$B(\phi) := \text{DDS}(I_3, 0, K_1, A(\phi), A_0, B_0)$$

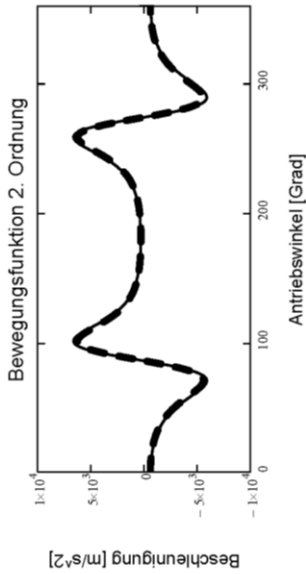
kinematisches Schema der Ellipsenräder



Verifikation der Ergebnisse mit dem MKS-Modell

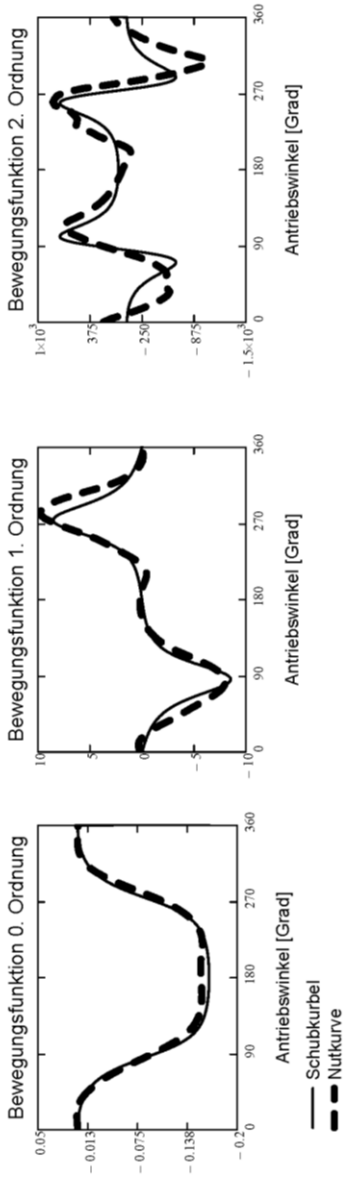
Animation






Vergleich der Schubkurbelanordnung mit der BMV 16 unter vergleichbaren Randbedingungen

□






9.6    Physikalische Machbarkeit




TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ



Professur für Montage- und  
Handhabungstechnik

Projekt  
Physikalische Machbarkeit und Eingangsgrößen

Bearbeitungsstand vom  
07.10.2015

 MathTool-Analyse-Toolbox (A-TB)

Flechtwinkel

$\alpha := 54^\circ$

Radius Flechtschlauch

$R := 10\text{mm}$

Fadenbreite

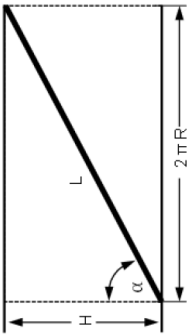
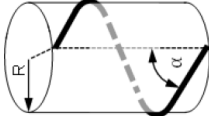
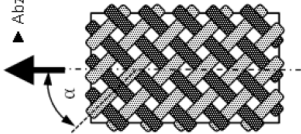
$b_{FF} := 2\text{mm}$

Anzahl Flechtfäden  
Antriebsdrehzahl am  
Schussfadensystem

$N_{FF} := 16$   
 $n_{FS} := 37.5\text{min}^{-1}$

Antriebsgeschwindigkeit

$\omega_{FS} := 2\pi \cdot n_{FS}$



▶ Abzug

▶ Flechtschlauchradius

▶ Schlaglänge für einen Rapport

▶ Flechtadenlänge für einen Rapport

▶ Flechtwinkel

1/6

Schlaglänge  
$$H = \frac{2\pi \cdot R}{\tan(\alpha)}$$

Zeit pro Rapport  
$$t_H = \frac{1}{\eta_{FS}}$$

Fadenlänge pro Rapport  
$$L = \frac{2\pi \cdot R}{\sin(\alpha)}$$

Abzugsgeschwindigkeit  
$$v_{ab} = \frac{H}{t_H}$$

Flechtdichte  
$$B = 1 - \left( 1 - \frac{b_{FF} \cdot N_{FF}}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \cos(\alpha)} \right)^2$$

Vorgaben für das Synthesemodell  
Spulenabmessungen (FSP 98/100/80) [Sti15]

- Wickeldurchmesser  
 $d_1 = 98\text{ mm}$
- Stegdurchmesser  
 $d_2 = 33\text{ mm}$
- Bohrungsdurchmesser  
 $d_3 = 10\text{ mm}$
- Gesamtlänge  
 $l_1 = 100\text{ mm}$
- Wickellänge  
 $l_2 = 80\text{ mm}$
- Masse Spule  
 $m_{\text{Spule}} = 0.2\text{ kg}$

Spulenträgerpräservant

- Bauraum-Außendurchmesser  
 $d_{\text{Bauraum}} = d_1 + 30\text{ mm}$
- Bauraum-Länge (mittig)  
 $l_{\text{Bauraum}} = l_1 + l_1$
- Abstand Spule-Flechtpunkt  
 $y_{MP} = 5\text{ mm}$

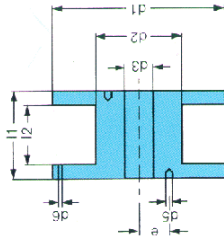
$H = 45.65 \text{ mm}$

$t_H = 1.6 \text{ s}$

$L = 77.664 \text{ mm}$

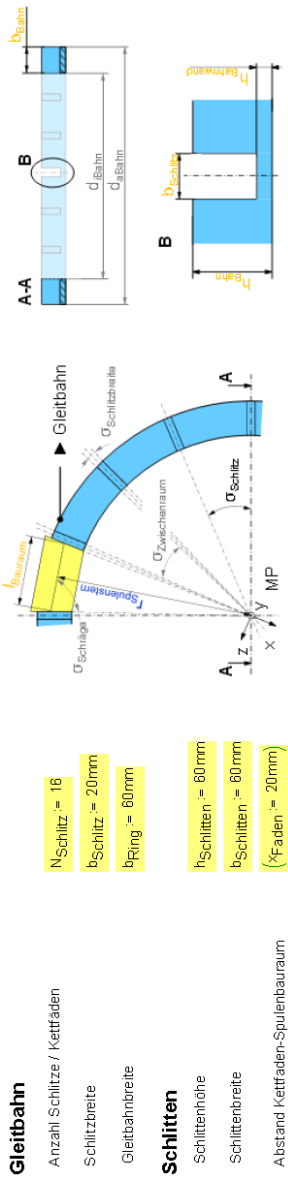
$v_{ab} = 0.029 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$B = 0.982$

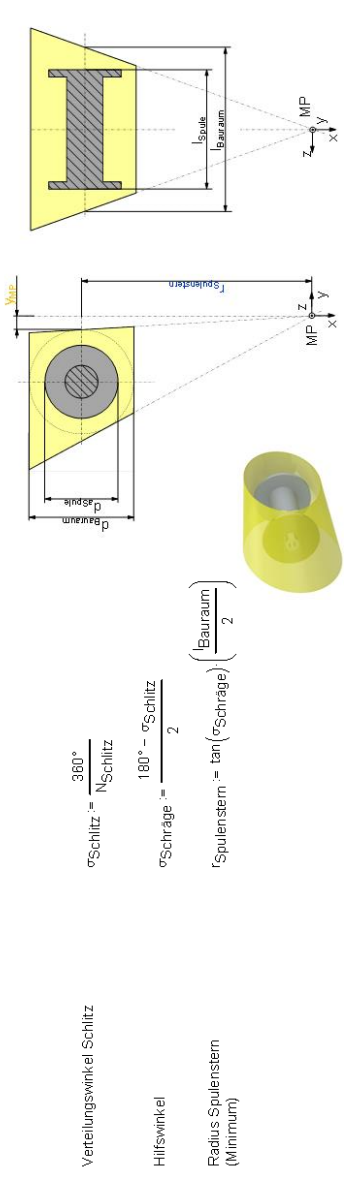


$d_{\text{Bauraum}} = 128 \text{ mm}$

$l_{\text{Bauraum}} = 200 \text{ mm}$



minimaler funktionaler Abstand der Spulenträger zur Hauptachse



Iteration

Radius Spulenstern nach Iteration (Minimum)

$r_{\text{Spulenstern}} = 554.818\text{ mm}$

Variantenvergleich der F¼hrung des Spulentr¼gers

Variante 1: "Spule auf Ring"

▢

Variante 2: "Spule au¼erhalb Ring"

▢

**Nachrechnung Variante 2 mit gleichem Innendurchmesser**

▢

Variante 3: "Spule innerhalb Ring"

▢

Variante 2B: "Spule au¼erhalb und Schliffen auf Ring"

▢

**Nachrechnung Variante 2B mit gleichem Innendurchmesser**

▢

Vorgabe der Spulentr¼gerparameter f¼r die Variante 2B zur physikalischen Machbarkeit

**Flechtmaterial**

Dichte

$$\rho_{\text{Material}} := \frac{7850}{\text{m}^3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Stahl	7850 kg/m³
Kupfer	8920 kg/m³
Glasfaser	2580 kg/m³
Kohlefaser	1800 kg/m³

**Systemabmessungen**

Radius zum Schwerpunkt  
Spule-Material

$$r_{\text{Spulenstern}} := r_{\text{SpulensternNV2}}$$

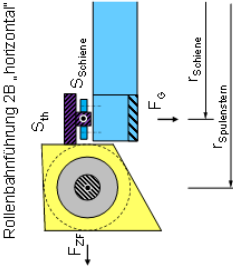
$$r_{\text{Spulenstern}} := r_{\text{SpulensternNV4}}$$

$$r_{\text{Spulenstern}} = 614.818 \cdot \text{mm}$$

Radius Schiene

$$r_{\text{Schiene}} := \frac{r_{\text{Spulenstern}} - \frac{d_{\text{Bauraum}}}{2} - \frac{b_{\text{Ring}}}{2}}$$

$$r_{\text{Schiene}} = 520.818 \cdot \text{mm}$$



Schwerpunkt- und Masseparameter aus CAD-System

Radius zum Schwerpunkt Spule-Material-Spulenträger	$r_{\text{Spulenträger}} := 580\text{mm}$
Radius zum Schwerpunkt Spule-Material-Spulenträger-Schlitten	$r_{\text{Schlitten}} := 550\text{mm}$
Masse Spulenträger	$m_{\text{Spulenträger}} := 2\text{kg}$
	$m_{\text{Schlitten}} := 2.2\text{kg}$

Kinematische Parameter des Schussfadensystems

 Geschwindigkeit und Beschleunigung

Kinetostatik des Schussfadensystems

 Fliehkraft und Tangentialkraft

Synchronisation der Kettfadenverlegung

Zeitintervall für den Kettfaden  
(eine Umdrehung)

$$t_{\text{FF}} := 0\text{s} \cdot \frac{t_{\text{H}}}{1440} \cdot t_{\text{H}}$$

$$t_{\text{H}} = 1.6\text{s}$$

Position der Kettfaden (Schlitz)

$$p := \alpha_{\text{Schlitz}} \cdot 2\alpha_{\text{Schlitz}} \cdot 360^\circ$$

$$p = \begin{array}{|c|} \hline 22.5 \\ \hline \dots \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \text{°} \\ \hline \end{array}$$

Zeit bis Schlitzanfang

$$t_{\text{FA}}(p) := \frac{t_{\text{H}}}{\left( p - \frac{\sigma_{\text{Zwischenraum}}}{2} \right) \cdot \frac{360^\circ}{\sigma_{\text{Zwischenraum}}}}$$

$$t_{\text{FA}}(p) = \begin{array}{|c|} \hline 0.055 \\ \hline \dots \\ \hline \end{array} \text{s}$$

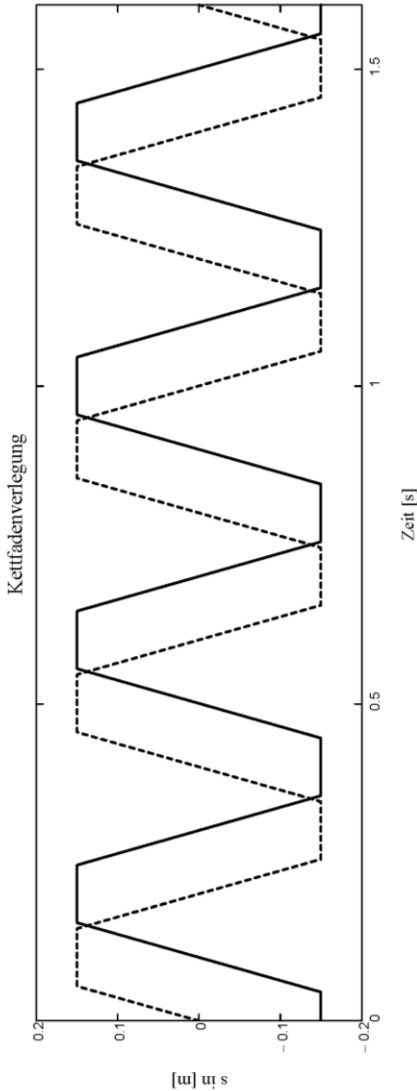
Zeit bis Schlitzende

$$t_{\text{FE}}(p) := \frac{t_{\text{H}}}{\left( p + \frac{\sigma_{\text{Zwischenraum}}}{2} \right) \cdot \frac{360^\circ}{\sigma_{\text{Zwischenraum}}}}$$

Relativbewegung zur Fachbildung

y<sub>Kett</sub> = 146.845 mm

Berechnung Positionsangaben



Export

## **Wissenschaftliche Schriftenreihe der CHEMNITZER MONTAGE- UND HANDHABUNGSTECHNIK**

- (1) Heine, Andreas (2015)  
Ein Beitrag zur kennwertorientierten Entwicklung kurvengesteuerter,  
ebener Schrittgetriebe  
ISBN 978-3-944640-51-8  
Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-163142>
  
- (2) Ebert, Falk (2015)  
Serielle Modellierung ebener Band- und Koppelgetriebe zur domänen-  
übergreifenden Gesamtsimulation von nichtlinearen Antriebssystemen  
ISBN 978-3-944640-58-7  
Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-171164>
  
- (3) Denninger, Daniel (2016)  
Prozessorientierte Synthesemethodik am Beispiel der neuartigen Ver-  
legetechnik "D-3F" zum Überflechten mit drei Fadensystemen  
ISBN 978-3-944640-80-8  
Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-199109>